



**Rui Filipe Oliveira Modelos de Cintilação na Banda Ka em Trajectória Terra-
Teixeira Satélite**



**Rui Filipe Oliveira Modelos de Cintilação na Banda Ka em Trajectória Terra-
Teixeira Satélite**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Armando Carlos Domingues da Rocha, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro

Trabalho desenvolvido com os dados resultantes do Projecto ESPREX
(Earth-Satellite Propagation Experiment): POSI/CHS/36555/2000.

O Júri

Presidente

Doutor José Fernando Rocha Pereira

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais

Doutor Armando Carlos Domingues da Rocha

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutor Francisco António Bucho Cercas

Professor Associado do Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa

Doutor Rafael Caldeirinha

Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Leiria

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Armando Rocha, pelo apoio, disponibilidade e motivação dada ao longo da realização deste trabalho.

Ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro pelas condições de trabalho que me proporcionou.

Ao Miguel Lacerda e Paulo Gonçalves, equipa técnica do Instituto de Telecomunicações de Aveiro, pela ajuda dada na resolução de alguns problemas de hardware.

Aos meus amigos Miguel Pinheiro e Gaspar Dias pelo seu apoio e principalmente pelas suas sugestões a nível de programação.

Em especial aos meus Pais e à Ana, minha namorada, por todo o apoio e compreensão ao longo destes meses.

Palavras-chave

Comunicações por Satélite, Propagação Terra-Satélite, Cintilação, Modelos de cintilação, Atenuação, Despolarização, Medidas Meteorológicas

Resumo

Com o constante aumento da frequência e da largura de banda usada nas comunicações via satélite, é essencial ter um bom conhecimento do comportamento do sinal que atravessa a atmosfera.

O principal objectivo deste trabalho foi o estudo do fenómeno de cintilação na troposfera e a criação de uma base de dados de cintilação, tendo em vista a verificação dos modelos de previsão existentes. Esta motivação resulta do défice de dados de cintilação com a requerida diversidade geográfica e, em particular, nesta região da Europa, caracterizada por um ambiente marítimo temperado.

Nos dois primeiros capítulos, é efectuada uma introdução genérica à propagação de microondas na atmosfera descrevendo os principais fenómenos de propagação: atenuação, despolarização e cintilação.

Após os capítulos introdutórios, é feito um estudo mais aprofundado sobre o fenómeno de cintilação. São ainda apresentados modelos de previsão da variância do fenómeno e respectivas distribuições de amplitude.

É também descrito o sistema experimental implementado na Universidade de Aveiro (40.5°N, 8°W) que, entre Janeiro e Dezembro de 2005, adquiriu de uma forma contínua dados meteorológicos e de propagação da baliza de 19.701GHz do satélite HotBird-6 da EutelSat. São ainda descritas as aplicações de software necessárias à análise dos dados destacando-se a aquisição de dados, pré-processamento e processamento estatístico.

Este trabalho é finalizado com a apresentação dos dados estatísticos do fenómeno de cintilação e os resultados comparados com alguns dos modelos apresentados no terceiro capítulo.

Keywords

Satellite communications, Earth-Satellite propagation, Scintillation, Scintillation models, Attenuation, Depolarization, Meteorological Measurements

Abstract

The use of higher and higher frequencies for Earth-Satellite communication requires a detailed characterization of the tropospheric propagation channel.

The main purpose of this work was the preparation and study of a new scintillation experimental database towards the verification of available propagation models. Scintillation database is relatively scarce worldwide and mainly in this maritime European region.

The first two chapters present an overview of microwave propagation in the atmosphere with emphasis in attenuation, depolarization and scintillation.

After the first introductory chapters the scintillation phenomena is detailed. The most well-known statistical models concerning variance and signal level distributions are presented.

The experiment, in the University of Aveiro (40.5 °N, 8 °W), that provided one year of data between January and December 2005 by collecting 19.701GHz HotBird-6 Eutelsat beacon is also described. The software developed and used for data processing is, as well, briefly explained. The applications envisaged are acquisition, time series pre-processing and statistical processing.

The statistical scintillation data is presented and compared against the models described in the third chapter.

Índice

Índice.....	i
Símbolos	v
Abreviaturas.....	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xv
1 Introdução	1
1.1 Estrutura da Tese	3
2 Propagação de Ondas na Atmosfera.....	5
2.1 Atmosfera e dinâmica da troposfera	5
2.2 Parâmetros meteorológicos.....	7
2.2.1 Temperatura.....	7
2.2.2 Humidade	8
2.2.3 Nuvens	9
2.2.4 Precipitação.....	11
2.3 Fenómenos de propagação	12
2.3.1 Atenuação.....	13
2.3.2 Despolarização	19
2.3.3 Cintilação	21
3 Cintilação: Caracterização e modelização	23
3.1 Caracterização teórica.....	23
3.1.1 O espectro de Kolmogorov	24
3.1.2 Variância	25
3.1.3 Espectro	26
3.1.4 Escalonamento da variância.....	27
3.2 Distribuição da amplitude χ	28
3.3 Distribuição do desvio padrão σ_χ	29
3.4 Observações de cintilação.....	29

3.5	Revisão à base de dados existente	30
3.6	Modelos de cintilação	32
3.6.1	KARASAWA	32
3.6.2	ITU P.618-8.....	33
3.6.3	OTUNG	35
3.6.4	ORTGIES	36
3.6.5	VAN DE KAMP	37
3.6.6	TERVONEN.....	38
3.6.7	MARZZANO	39
4	Campanha experimental	43
4.1	Hardware	43
4.1.1	Sistema de recepção	43
4.1.2	Estação meteorológica.....	48
4.1.3	Sistema de aquisição.....	49
4.1.4	Evolução da campanha experimental	49
4.2	Software	50
4.2.1	Aplicação de aquisição de dados.....	50
4.2.2	Aplicação de processamento de dados (1 amostra/s)	51
4.2.3	Aplicação de processamento estatístico	52
4.2.4	Aplicação de pré-processamento de dados de cintilação	58
4.2.4.1	Extracção de cintilação	58
4.2.4.2	Implementação da aplicação	60
4.2.5	Aplicação de processamento estatístico da cintilação.....	62
5	Análise de dados	65
5.1	Temperatura	66
5.2	Humidade relativa.....	71
5.3	Precipitação	76
5.4	Cobertura de nuvens	79
5.5	Velocidade do vento.....	80
5.6	Factores usados em modelos dependentes de parâmetros meteorológicos (N_{wet} , $N_{wet}+Q$).....	84
6	Validação dos dados adquiridos e dos modelos existentes	89

6.1	Resultados de longa duração.....	89
6.2	Distribuições	91
6.2.1	Distribuições Cumulativas dos <i>fades</i> e <i>enhancements</i>	91
6.2.2	Distribuições da intensidade de cintilação	94
7	Conclusões e trabalho futuro.....	97
8	Referências	101

Símbolos

χ	- Amplitude da Cintilação, [dB]
χ^+	- Distribuição dos valores positivos da amplitude da cintilação, [dB]
χ^-	- Distribuição dos valores negativos da amplitude da cintilação, [dB]
χ^{pkpk}	- Distribuição das flutuações pico a pico da amplitude da cintilação, [dB]
σ^2	- Variância da cintilação, [dB ²]
σ	- Intensidade da cintilação (desvio padrão), [dB]
$\sigma_{\chi.ref}$	- Desvio padrão de referência em modelos de cintilação, [dB]
ϑ	- Ângulo de elevação da antena, [°]
N_{wet}	- Índice de refração húmido, [ppm]
H	- Humidade Relativa, [%]
T	- Temperatura, [°C]
$T(h)$	- Temperatura em função da altura, [°C]
T_i	- Temperatura na altura máxima de cada camada atmosférica, [°C]
L_i	- Gradiente de temperatura para uma dada camada atmosférica, [°C/km]
h	- Altura da medição da temperatura, [km]
H_i	- Altura máxima de uma dada camada atmosférica, [km]
ρ	- Humidade absoluta, [g/m ³]
ρ_s	- Humidade absoluta em condições de saturação, [g/m ³]
e	- Pressão parcial do vapor de água, [hPa]
e_s	- Pressão parcial de saturação do vapor de água, [hPa]
$\rho(h)$	- Humidade absoluta em função da altura, [g/m ³]
A_o	- Atenuação zenital devido ao oxigénio, [dB]
A_w	- Atenuação zenital devido ao vapor de água, [dB]
h_o	- Altura equivalente para o oxigénio, [km]
h_w	- Altura equivalente para o vapor de água, [km]
γ_o	- Atenuação específica do oxigénio, [dB/km]
γ_w	- Atenuação específica do vapor de água, [dB/km]

$V_t(p)$	- Valor integrado do vapor de água na atmosfera, [kg/m ²] ou [mm]
γ_c	- Atenuação específica de nuvens e/ou nevoeiro, [dB/km]
K_l	- Coeficiente da atenuação específica γ_c de nuvens ou nevoeiros, [(dB/Km)/(g/m ³)]
f	- Frequência, [GHz] ou [Hz]
ϵ	- Permitividade complexa de um dieléctrico
M	- Densidade de água líquida nas nuvens ou nevoeiro, [g/m ³]
N_w''	- Parte imaginária da refractividade complexa, [ppm]
L	- Quantidade de água total numa coluna de massa de ar, [kg/m ²]
P	- Potência de sinal que atravessa uma célula de chuva
α	- Constante de atenuação, [dB/km]
$N(D)$	- Densidade do número de gotas de tamanho D por m ³ , [mm ⁻¹ m ⁻³]
$C(D)$	- Constante de scattering na gota de água
D	- Diâmetro das gotas de chuva, [mm]
Λ	- Parâmetro de distribuição de $N(D)$, [mm ⁻¹]
N_0	- Constante da distribuição de $N(D)$, [mm ⁻¹ m ³]
A	- Atenuação, [dB]
a	- Coeficiente para cálculo atenuação específica (dependente da frequência) num meio com taxa de precipitação R
b	- Coeficiente para cálculo atenuação específica (dependente da frequência) num meio com taxa de precipitação R
L_e	- Percurso efectivo da onda na célula de chuva, [km]
γ_r	- Atenuação específica da precipitação, [dB/km]
D	- Anisotropia do meio de propagação, [km ⁻¹]
ϕ	- Ângulo de inclinação da população de partículas em relação à vertical, [°]
L_o	- Dimensão de larga escala de um volume atmosférico com turbulência, [km]
l_o	- Dimensão interior da turbulência interior, [km]
K	- Frequência espacial do espectro espacial de Kolmogorov, [km]
Φ_n	- Densidade espectral das flutuações do índice de refração de Kolmogorov
v_t	- Componente da velocidade do volume turbulento transversal à ligação, [m/s]
k	- Número de onda

L	- Percurso com turbulência, [km]
D	- Diâmetro da antena, [m]
D_e	- Diâmetro efectivo da antena, [m]
z	- Distância entre a camada turbulenta e o receptor, [km]
x	- Relação entre o D_e e o raio do primeiro elipsóide de Fresnel
η	- Eficiência da antena
$g(D_e)$	- Factor de suavização da abertura da antena
a_e	- Raio efectivo da Terra, $8.5 \cdot 10^6$ m
ω_c	- Frequência angular de canto do espectro de cintilação, [rad/s]
ω_s	- Frequência acima da qual o espectro de cintilação é condicionado pela abertura da antena, [rad/s]
ω_0	- Frequência de Fresnel, [rad/s]
$W^0(\omega)$	- Densidade espectral de potência de cintilação para baixas frequências para antena pontual, [dB ² /rad/s]
$W^\infty(\omega)$	- Densidade espectral de potência de cintilação para altas frequências para antena pontual, [dB ² /rad/s]
$W^0(\omega, D)$	- Densidade espectral de potência de cintilação para baixas frequências e antena de diâmetro D , [dB ² /rad/s]
$W^\infty(\omega, D)$	- Densidade espectral de potência de cintilação para altas frequências e antena de diâmetro D , [dB ² /rad/s]
$p(y)$	- Distribuição Gaussiana, na Eq.3-10.
I_0	- Função de Bessel modificada de ordem zero.
$p(\sigma)$	- Distribuição Log-normal, proposta por Moulslley e Vilar, na Eq.3-11.
$p(\sigma)$	- Distribuição Gama, proposta por Karasawa, na Eq.3-12.
$\Gamma()$	- Função Gama, $\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx$
η_{D_e}	- Factor que reflecte a dependência do diâmetro da antena no modelo de Karasawa
η_θ	- Factor que reflecte a dependência do ângulo de elevação no modelo de Karasawa
η_f	- Factor que reflecte a dependência da frequência no modelo de Karasawa
η_+	- Distribuição dos valores positivos (enhancements) da amplitude da cintilação, no modelo de Karasawa, [dB]

η_-	- Distribuição dos valores negativos (<i>fades</i>) da amplitude da cintilação, no modelo de Karasawa, [dB]
$\chi_{\chi a}$	- Distribuição cumulativa anual da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
χ_{+a}	- Distribuição cumulativa anual dos valores positivos da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
χ_{-a}	- Distribuição cumulativa anual dos valores negativos da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
χ_{pkpKa}	- Distribuição cumulativa anual das flutuações pico a pico da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
$\chi_{\chi wm}$	- Distribuição cumulativa do pior mês para amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
χ_{+wm}	- Distribuição cumulativa do pior mês dos valores positivos da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
χ_{-wm}	- Distribuição cumulativa do pior mês dos valores negativos da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
χ_{pkpkwm}	- Distribuição cumulativa do pior mês das flutuações pico a pico da amplitude da cintilação, no modelo de Otung, [dB]
σ_{pre}	- Valor de referência do desvio padrão de cintilação, [dB]
Q	- Parâmetro de longa duração de quantidade de água das nuvens, [kg/m ²]
W_{hc}	- Quantidade de água em nuvens carregadas, [kg/m ²]
$P(Cu)$	- Probabilidade de ocorrência de nuvens do tipo cúmulos, [%]
$P(Cu \cup Cb)$	- Probabilidade de ocorrência de nuvens do tipo cúmulos ou cúmulos-nimbos, [%]
V_c	- Densidade de vapor de água, no modelo de Marzzano, [g/m ³]

Abreviaturas

<i>Cu</i>	-	Nuvens do tipo cúmulos
<i>Cb</i>	-	Nuvens do tipo cúmulos-nimbos
ADC	-	Analog to Digital Converter
CNR	-	Densidade espectral da relação Sinal-Ruído
DAC	-	Digital to Analog Converter
ESA	-	European Space Agency
FFT	-	Fast Fourier Transform
FI	-	Frequência Intermédia
ITU	-	International Telecommunication Union
LNA	-	Low Noise Amplifier
OCXO	-	Oscilador a cristal estabilizado em forno
OL	-	Oscilador local
OMT	-	Transdutor de modos ortogonais
PTN	-	Pressão e Temperatura Normais
RF	-	Rádio Frequência
SNR	-	Relação Sinal-Ruído
VCXO	-	Oscilador a cristal controlado por tensão
VSAT	-	Very Small Aperture Terminal

Índice de Figuras

Figura 1-1 – Caracterização da dinâmica dos eventos de atenuação.	2
Figura 2-1 – Variação da temperatura ao longo das várias camadas da atmosfera.	8
Figura 2-2 – Formas das gotas de água de chuva.	12
Figura 2-3 – Atenuação zenital do oxigénio e vapor de água em condições PTN.	14
Figura 2-4 – Coeficiente da atenuação específica devido a pequenas gotas de água.	15
Figura 2-5 – Diagrama ilustrativo de um sinal de potência P a atravessar uma célula de chuva.	16
Figura 2-6 – Evento de atenuação devido a precipitação (23 de Novembro de 2006).	18
Figura 2-7 – Estatísticas cumulativas da atenuação: 28 meses.	18
Figura 2-8 – XPD em quadratura: Período de intensa trovoadas (14 Junho 2006).	20
Figura 2-9 – XPD-Quadratura versus Atenuação do copolar.	20
Figura 3-1 – Ligação que atravessa um meio turbulento.	24
Figura 3-2 – Densidade espectral de potência de um evento do dia 13-05-2005.	27
Figura 4-1 – Diagrama de blocos do sistema de recepção	44
Figura 4-2 – Esquema da unidade exterior do receptor (<i>front-end</i>).	44
Figura 4-3 – Esquema da unidade interior do receptor (<i>back-end</i>).	45
Figura 4-4 – Vista dos dois pluviómetros e abrigo do Termómetro e do Higrómetro	48
Figura 4-5 – Vista do anemómetro e do sistema de recepção	49
Figura 4-6 – Aspecto da aplicação de aquisição de dados.	51
Figura 4-7 – Estrutura de dados das estatísticas cumulativas.	54
Figura 4-8 – Estrutura de dados das estatísticas conjuntas de atenuação.	55
Figura 4-9 – Estatística conjunta entre a Atenuação e o XPD.	55
Figura 4-10 – Algoritmo de detecção de eventos.	56
Figura 4-11 – Estrutura de dados para armazenamento dos eventos.	57
Figura 4-12 – Estrutura de dados para armazenamento dos intereventos.	57
Figura 4-13 – Espectro de evento do dia 10 de Outubro de 2005 e respectiva série temporal.	59
Figura 4-14 – Janela de detecção e reparação de dados.	60
Figura 4-15 – Janela de extracção da cintilação.	60
Figura 4-16 – Janela de invalidação de dados suspeitos.	61
Figura 4-17 – Janela de selecção de eventos.	61
Figura 4-18 – Janela de validação de eventos.	61
Figura 4-19 – Algoritmo do cálculo da variância com intervalo de 60 segundos.	61
Figura 5-1 – Média mensal da temperatura do ano de 2005.	66
Figura 5-2 – Média horária da temperatura anual e por estação do ano.	66

Figura 5-3 – Variância e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus Temperatura para vários intervalos de tempo...	68
Figura 5-4 - Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus Temperatura para uma média horária anual.....	69
Figura 5-5 - Coeficientes de correlação entre a σ_χ e a Temperatura, para várias médias efectuadas.	70
Figura 5-6 – Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e Temperatura.	70
Figura 5-7 - Média mensal da Humidade Relativa.	71
Figura 5-8 - Média horária da Humidade Relativa anual e por estação	72
Figura 5-9 - Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus Humidade Relativa para vários intervalos de tempo.....	73
Figura 5-10 - Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus Humidade Relativa para uma média horária anual.....	74
Figura 5-11 - Coeficientes de correlação entre a σ_χ e a Humidade Relativa, para várias médias efectuadas.	75
Figura 5-12 – Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e Humidade Relativa.	75
Figura 5-13 - Média mensal da Precipitação do ano de 2005.....	76
Figura 5-14 - Média horária e por estação do ano da Precipitação.....	77
Figura 5-15 – Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus taxa de Precipitação para uma média diária.....	77
Figura 5-16 - Séries temporais de nível de sinal e cintilação de um período de precipitação do dia 10 de Outubro de 2005.	78
Figura 5-17 - Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e a Atenuação.	79
Figura 5-18 - Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e a Percentagem de Cobertura de Nuvens para os meses Abril, Maio e Junho de 2005.	80
Figura 5-19 - Média mensal da Velocidade do Vento.	81
Figura 5-20 – Velocidade do vento: Média horária anual e de cada estação do ano.	81
Figura 5-21 – Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus Velocidade do Vento para uma média diária...	82
Figura 5-22 – Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus Velocidade do Vento para uma média horária anual.....	83
Figura 5-23 - Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e a Velocidade de Vento.	84
Figura 5-24 – Variabilidade diária e mensal do N_{wet} e $N_{wet} + Q$	85
Figura 5-25 - Média horária do N_{wet} anual.	86
Figura 5-26 - Variação e <i>Scatter plot</i> da σ_χ versus N_{wet} e $N_{wet} + Q$ para uma média mensal.	87
Figura 5-27 – Variação e <i>Scatter plot</i> de σ_χ versus N_{wet} e $N_{wet} + Q$ para uma média horária anual.	87
Figura 6-1 - Média horária da $\sigma_{\chi,medido}$ e $\sigma_{\chi,prev}$ anual.	89
Figura 6-2 - Variação e <i>Scatter plot</i> de $\sigma_{\chi,medido}$ versus $\sigma_{\chi,prev}$ para uma média mensal.	90

Figura 6-3 – Distribuição mensal de <i>enhancements</i> e fades para os dados medidos.	92
Figura 6-4 – Distribuição anual de <i>enhancements</i> e fades medidos e calculados por modelos.....	93
Figura 6-5 – Distribuição cumulativa e densidade de probabilidade de σ_{χ}	94
Figura 6-6 – Distribuição Cumulativa $\sigma_{\chi, \text{ medido}}$ e $\sigma_{\chi, \text{ prev}}$	95

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 – Gases que compõem a atmosfera [7].	6
Tabela 2-2 – Resumo de alguns tipos de nuvens e sua descrição.	10
Tabela 2-3 – Valores dos parâmetros para distribuição de tamanho de gotas.	17
Tabela 3-1 – Locais onde foram realizadas campanhas de medidas [28].	31
Tabela 3-2 – Coeficientes das regressões quadráticas para STH2 e STN2.	40
Tabela 3-3 – Coeficientes das regressões quadráticas para STHV2 e STNV2.	41
Tabela 4-1 – Características do satélite utilizado na recepção da baliza.	45
Tabela 4-2 – Valores relativos ao sistema de recepção, utilizados no cálculo do balanço de potências.	46
Tabela 4-3 – Características do sistema de recepção.	47
Tabela 4-4 – Canais carregados pela aplicação.	53
Tabela 4-5 – Parâmetros a correlacionar com a atenuação	54
Tabela 4-6 – Dados carregados na aplicação de processamento estatístico de cintilação	63
Tabela 5-1 – Coeficientes de correlação entre σ_{χ} e Velocidade do Vento, para as várias médias.	83
Tabela 6-1 - Coeficientes de correlação entre $\sigma_{\chi,medido}$ e ITU $\sigma_{\chi,prev}$, para as várias médias.	90

1 Introdução

A utilização de sistemas de telecomunicações por satélite, em detrimento ou complemento de outras soluções, traz grandes vantagens, tais como [1]:

- Capacidade de difusão de sinal numa área terrestre muito grande;
- Possibilidade de cobrir locais remotos sem qualquer outra infra-estrutura terrestre ou em situações de catástrofe;
- Facilidade de comunicações de e para aeronaves comerciais;
- Oferta de elevada largura de banda e serviços inovadores;
- Maior imunidade a congestionamentos;

A utilização destes sistemas nas mais diversas aplicações, tem vindo a aumentar consideravelmente sendo que neste momento a banda C (4 e 6 GHz) já está saturada e a banda Ku (12 e 14 GHz) está próxima da saturação. Sistemas utilizando as bandas Ka (20 e 30 GHz) e V (40 e 50 GHz) estão em desenvolvimento acelerado, tendo sido lançado há já algum tempo o primeiro satélite comercial que usa a banda Ka (ANIK-F2). Estas novas frequências trazem uma largura de banda acrescida, possibilitando a implementação de novas aplicações [2]. A utilização de plataformas estratosféricas estacionadas sobre as áreas a servir e usando a banda Ka têm também merecido a atenção da comunidade científica em recentes projectos europeus.

Com o desenvolvimento de uma série de novas tecnologias (desde antenas inteligentes à electrónica de forma genérica), tendo em conta o posicionamento dos satélites geoestacionários, é possível a criação de um *backbone* intercontinental de telecomunicações. Para além das aplicações já implementadas, deverá ser possível a oferta de serviços e redes adaptadas a diferentes necessidades [1].

Apesar das vantagens já referidas, existem dois factores com os quais as empresas que disponibilizam serviços via satélite, à semelhança de outros operadores, tem grande preocupação: a Qualidade de Serviço e a Disponibilidade de Serviço.

De facto, estes factores podem ser degradados devido às características do meio de propagação. No caso particular das bandas Ka e V, a troposfera condiciona de forma determinante o sinal.

Os fenómenos de propagação a ter em conta são: atenuação, despolarização e cintilação [2].

A atenuação tem como principal causa a precipitação ao longo do caminho percorrido pelo sinal. No entanto, os gases atmosféricos e água não precipitável - nuvens densas (com uma grande

quantidade de água) e nevoeiros - também absorvem o sinal. O fenómeno será descrito em pormenor e ilustrado com exemplos recolhidos na estação de Aveiro no capítulo 2.3.1.

O estudo da dinâmica da atenuação, além de meras estatísticas cumulativas, é de extrema importância dada a sua relevância para o desenvolvimento de sistemas de contra medida. Estes sistemas são usados para detectar e compensar a degradação do sinal. Alguns dos factores considerados no seu desenvolvimento são [3]:

- *Fade Duration* – este factor permite estimar a duração de indisponibilidade de serviço;
- *Fade Return* – factor que fornece a informação sobre durante quanto tempo o serviço estará disponível sem interrupção;
- *Fade Slope* – permite estimar qual será a atenuação num instante posterior tendo em conta o declive do mesmo.

A Figura 1-1, retirada da recomendação ITU-R P.1623 [4], representa de uma forma resumida a dinâmica de eventos de atenuação.

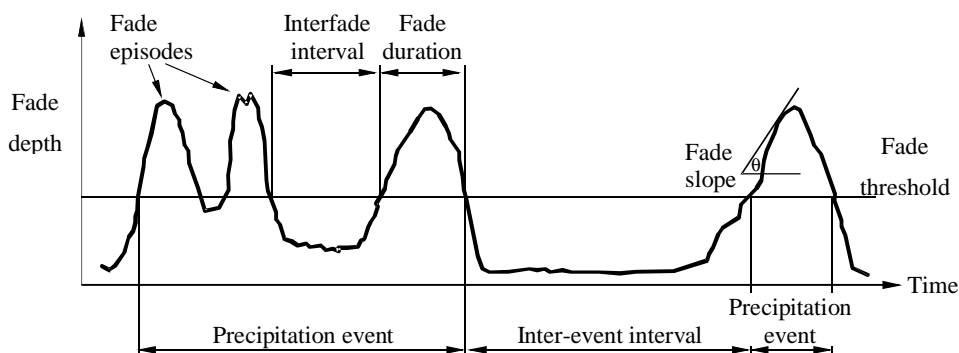


Figura 1-1 – Caracterização da dinâmica dos eventos de atenuação.

O desenvolvimento de simuladores de canal de propagação tem sido um campo de pesquisa recente e os parâmetros referidos anteriormente são, directa ou indirectamente, usados na respectiva parametrização [5] e [6].

A despolarização consiste na transferência de potência do sinal numa determinada polarização para a polarização ortogonal ao atravessar um meio anisotrópico. A presença na atmosfera de partículas não esféricas com uma orientação preferencial (gotas de chuva e cristais de gelo nas nuvens) é uma das causas do fenómeno que será abordado no capítulo 2.3.2. O fenómeno pode levar à interferência entre dois sinais transmitidos na mesma banda mas com polarização ortogonal (re-uso de polarização).

O fenómeno de cintilação consiste em flutuações rápidas de nível de sinal devido às variações temporais e espaciais do índice de refração devido à turbulência atmosférica. A turbulência tem origem em desequilíbrios termodinâmicos na atmosfera devido a variações de temperatura, humidade e pressão e consequentemente têm impacto principalmente no índice de

refracção húmido, N_{wet} . Apesar da atenuação devido a precipitação ser o fenómeno com mais impacto no nível de sinal, a cintilação também introduz atenuação.

A atenuação devida à cintilação tem um papel mais preponderante em sistemas que operam com baixo ângulo de elevação e reduzida margem de atenuação, como por exemplo os VSAT's. O conhecimento das características do fenómeno é de extrema importância para o dimensionamento dos sistemas de telecomunicações pois pode perturbar malhas de controlo de potência e sistemas de seguimento de antenas. O fenómeno de cintilação - tema central da tese - será mais aprofundado nos capítulos 2.3.3 e 3.

A caracterização experimental de suporte aos modelos de propagação tem sido realizada com dados adquiridos usando diversos satélites experimentais: OTS, Sírío, Olympus, ITALSAT, etc. O Olympus, talvez o que originou uma maior recolha de dados, foi um satélite experimental para telecomunicações lançado em 1989 pela ESA. Este satélite, geoestacionado a 341°E, possuía três balizas dedicadas a experiências de propagação e durante o tempo de vida foram realizadas várias campanhas de aquisição de dados por toda a Europa (em particular Helsinki/Kirkukkonummi, Eindhoven, Milão, Darmstadt, Louvaina, Aveiro) e em alguns locais na América do Norte [2].

1.1 Estrutura da Tese

Esta tese tem como objectivo estudar um dos fenómenos de propagação: a cintilação. O estudo será efectuado com base nos dados adquiridos entre Janeiro e Dezembro 2005, usando uma baliza do satélite HotBird-6. Os dados serão relacionados com dados meteorológicos recolhidos no local e com os modelos mais conhecidos.

O documento será composto pelos capítulos que a seguir se descrevem:

Capítulo 2 - neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de propagação de microondas na atmosfera e suas condicionantes. Abordam-se os seguintes temas: atmosfera e dinâmica atmosférica, parâmetros meteorológicos e fenómenos de propagação.

Capítulo 3 - neste capítulo descrevem-se todos os aspectos relevantes sobre o fenómeno de cintilação.

Capítulo 4 - apresenta e descreve com pormenor o receptor - hardware e software - usado na campanha experimental. A nível de hardware são descritos os sistemas de recepção da baliza, estação meteorológica e sistema de aquisição de dados. Na parte de software são descritas todas as indispensáveis aplicações desenvolvidas e usadas neste trabalho, desde a aplicação de aquisição de dados até às aplicações de processamento estatístico dos dados.

Capítulo 5 - apresenta os resultados da análise de dados, sendo comparados os resultados obtidos com os modelos baseados exclusivamente em dados meteorológicos.

Capítulo 6 - apresenta a validação dos dados e de alguns dos modelos descritos no capítulo 3. Com esta análise pretende-se concluir se os modelos estudados se adaptam ao canal de propagação da região onde esteve instalado o sistema de recepção (Aveiro).

Capítulo 7 – por fim apresenta as principais conclusões tiradas a partir de todos os estudos realizados.

2 Propagação de Ondas na Atmosfera

Este capítulo pretende descrever brevemente a constituição da troposfera, a dinâmica dos fenómenos que nela ocorrem e os aspectos da caracterização meteorológica de relevo para esta tese. Os principais fenómenos de propagação associados são descritos brevemente.

A Terra é uma imensa máquina termodinâmica que tenta compensar os diferenciais de temperatura e pressão que se desenvolvem devido ao aquecimento desigual da superfície. A nossa perspectiva centra-se nas movimentações de massas de ar na troposfera que se traduzem em diversos fenómenos meteorológicos de relevo neste contexto.

2.1 Atmosfera e dinâmica da troposfera

A atmosfera é habitualmente dividida em várias camadas e talvez a classificação mais comum seja a baseada no gradiente da temperatura com a altitude. Resumidamente:

- Troposfera: até aos 7Km nos pólos e 17Km no equador. A temperatura decresce com a altitude.
- Estratosfera: tem início a uma altura aproximada de 17Km e prolonga-se até aos 50km. A temperatura aumenta com altura.
- Mesosfera e Termosfera. A Termosfera estende-se até cerca de 600km.

Em termos de propagação de microondas, na banda de interesse para este trabalho, a troposfera é a camada mais importante. A Ionosfera pode também provocar excepcionalmente cintilação com amplitude significativa até 20GHz, devido à denominada anomalia equatorial, contudo, não causa absorção significativa para sinais acima de alguns GHz. A variação de fase relativa entre dois sinais de microondas de frequências distintas é contudo observável como consequência da variação diurna do índice de refração desta camada. A contribuição da Ionosfera é, por exemplo, relevante para sistemas de navegação por satélite dada a contribuição para o atraso de grupo.

A troposfera é constituída por diversos gases que se encontram bem misturados. Os mais importantes constam da Tabela 2-1 [7]. Para efeitos de propagação na banda Ka apenas o oxigénio e o vapor de água são de considerar.

O vapor de água é um gás com uma elevada variabilidade geográfica, sazonal e mesmo diária pelo que tem merecido atenção particular em propagação.

Gases Permanentes		Gases Variáveis	
Azoto (N ₂)	78,08 %	Vapor de água (H ₂ O)	0 à 4 %
Oxigénio (O ₂)	20,95 %	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,037 %
Árgon (Ar)	0,93 %	Metano (CH ₄)	0,00017 %

Tabela 2-1 – Gases que compõem a atmosfera [7].

A troposfera tem particular interesse por ser nela que se desenrolam a maior parte dos fenómenos meteorológicos de relevo para a propagação acima da banda Ku, nomeadamente:

- Variação da temperatura e humidade;
- Precipitação (líquida ou sólida);
- Nuvens;
- Velocidade do vento.

Os gases da troposfera estão em perpétuo movimento e a caracterização desta deslocação descreve-se em várias escalas. A escala mais pequena, denomina-se por micro escala e é composta por pequenos turbilhões de ar da ordem de alguns metros. Este tipo de movimentações de ar tem uma duração muito curta.

O nível seguinte é a mesoescala, e tipicamente, tem dimensões da ordem das centenas de quilómetros tendo uma duração de algumas horas. A ocorrência de movimentações de ar desta ordem de grandeza pode dar origem a ventos e trovoadas.

A escala sinóptica está localizada à volta das variações de pressão (cyclones ou anti-cyclones) e estende-se por milhares de quilómetros quadrados podendo ter uma duração de algumas semanas.

A percepção da variação do “estado do tempo” deve-se normalmente à passagem de fronteiras entre massas de ar quentes ou frias (ou uma mistura das duas) por uma determinada região: as denominadas frentes. As frentes podem criar uma interface de grande instabilidade como foi muitas vezes observado pelo claro incremento da intensidade de cintilação medida no nosso local. Normalmente deslocam-se de Oeste para Este em forma espiral, devido ao efeito *Coriolis* [8].

Podem-se realçar quatro tipos de frentes:

- Frente Fria: ocorre quando se dá a aproximação de uma massa de ar frio sobre uma massa de ar quente. A fronteira entre ambas é abrupta com a ocorrência de nuvens densas de elevado desenvolvimento vertical, chuva intensa e trovoadas. A ocorrência de granizo e neve, consoante os locais, é também possível. Observam-se ainda fenómenos de despolarização por gelo.
- Frente Quente: originada aquando da aproximação de uma massa de ar quente sobre uma massa de ar frio. Esta frente move-se de uma forma mais lenta e produz

efeitos menos severos que a frente fria. A sua passagem anuncia-se por nuvens cada vez mais baixas e poderá ocorrer precipitação ligeira, um aumento da temperatura e posterior tempo seco. Eventualmente poderão ocorrer trovoadas.

- Frente Occluded: é a fronteira criada quando uma frente fria que se desloca mais rapidamente consegue alcançar uma frente quente. Este tipo de dinâmica entre duas massas de ar é anunciada por nebulosidade alta e possível precipitação. À sua passagem a temperatura irá descer se a frente for do tipo frio e irá subir se a Frente Occluded for do tipo quente. Poderá ocorrer precipitação contínua e aguaceiros fortes. Após a passagem de uma Frente Occluded do tipo frio, a temperatura diminui. No caso de ser do tipo quente, a temperatura será moderada acompanhada de precipitação ligeira a moderada, seguida de abertas.
- Frente Estacionária: é a designação dada à fronteira criada por duas massas de ar diferentes, sendo que nenhuma das duas se sobrepõe à outra. Este tipo de frente tem maior ocorrência nos meses de Verão no entanto, e apesar de poderem existir diversas condições meteorológicas ao longo da frente, normalmente dá origem nuvens e a precipitação.

A dimensão, orientação e duração destas estruturas atmosféricas é relevante para a modelação de sistemas de telecomunicações usando microondas nomeadamente em aspectos referentes a diversidade espacial.

Como se pode depreender do anteriormente dito na troposfera decorrem processos bastante complexos. Acompanhando esta instabilidade, e numa escala muito mais reduzida, irão ocorrer variações espaciais e temporais de pressão, humidade e temperatura dando origem a variações do índice de refração.

Um outro mecanismo que pode contribuir para condições de turbulência, mas mais de natureza local e predominante durante o dia, consiste na ascensão de massas de ar quente (buoyancy) cuja densidade se tornou menor que atmosfera envolvente.

2.2 Parâmetros meteorológicos

2.2.1 Temperatura

A variação diária da temperatura desenrola-se de forma lenta. Com o nascer do Sol, a temperatura começa a subir atingindo o máximo por volta do meio do dia. Como o ar não é bom condutor de calor, o aquecimento inicia-se próximo da superfície terrestre.

Alguns modelos de propagação exigem valores de referência para a temperatura, pressão e humidade. No caso da temperatura definem-se sete níveis - Figura 2-1-, sendo que em cada um deles a temperatura apresenta um padrão de variação diferente [9].

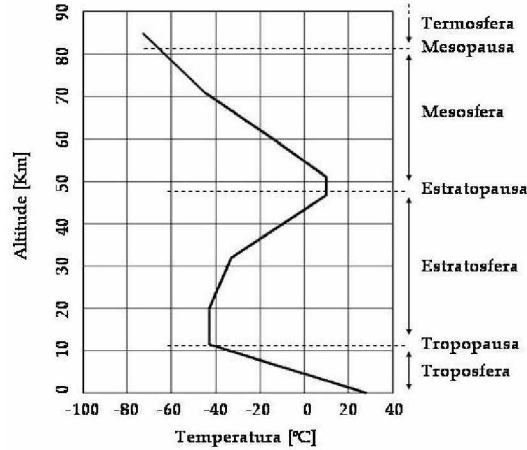


Figura 2-1 – Variação da temperatura ao longo das várias camadas da atmosfera.

Assumindo que a troposfera se encontra em condições adiabáticas, a temperatura deverá diminuir com a altitude e o declive médio é de cerca de $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C/km}$. O valor da temperatura T em função da altura h é obtido através da Eq. 2-1:

$$T(h) = T_i + L_i(h - H_i) \quad \text{Eq. 2-1}$$

Onde a altura base da camada é H_i e L_i representa o gradiente de temperatura.

A temperatura, em equipamentos de referência para meteorologia, é normalmente medida usando como sensor uma resistência PT100. Um medidor de temperatura deste tipo faz parte do equipamento meteorológico da estação.

2.2.2 Humidade

O vapor de água é o gás mais variável na atmosfera: apresenta variações sazonais importantes e por vezes mesmo durante o dia. Existem várias formas de quantificar a humidade atmosférica, no entanto, a mais usual consiste na denominada humidade relativa [%], ou seja, a relação entre o valor actual da densidade de vapor de água no ar (expresso em g/m^3) e o valor da densidade de vapor de água em condições de saturação à mesma temperatura, Eq.2-2, [7].

$$RH = \frac{\rho}{\rho_s} \quad \text{Eq.2-2}$$

Outra forma de calcular a humidade relativa é a relação entre o valor da pressão parcial de vapor de água e o respectivo valor em condições de saturação. Este resultado é dado em percentagem, Eq.2-3.

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \% \quad \text{Eq.2-3}$$

Uma vez que a humidade de saturação aumenta com a temperatura, uma mesma quantidade de vapor de água corresponde a diferentes valores de humidade relativa consoante a temperatura.

O vapor de água diminui de forma acentuada com a altitude. Segundo a recomendação ITU-R P.835-4, o vapor de água decresce exponencialmente com a altitude, Eq.2-4, [9].

$$\rho(h) = \rho_o \exp(-h/h_o), h_o=2\text{km e } \rho_o=7.5 \text{ g/m}^3 \quad \text{Eq.2-4}$$

A quantidade de água total existente numa coluna cilíndrica vertical de 1m^2 de área de base denomina-se o valor integrado de vapor de água (IWV) e representa-se em mm (altura da água) ou Kg/m^2 . O valor para uma atmosfera PTN é de 15mm. O IWV, que ignora as condições ao longo do trajecto, é importante nos modelos de atenuação por gases.

Para a medição da humidade relativa são usados higrómetros de cabelo ou higrómetros eléctricos. O instalado na estação em Aveiro é um higrómetro de cabelo da Thies Clima com uma gama dinâmica de 10 a 90%. Periodicamente é regenerado para manter as condições de funcionamento óptimas embora em Aveiro não seja absolutamente necessário.

2.2.3 Nuvens

As nuvens formam-se quando o vapor de água existente no ar condensa, dando origem a uma elevada concentração de pequenas gotas de água, tornando as nuvens visíveis. O tamanho médio das gotas que compõem as nuvens é de alguns μm [10]. O aparecimento de nuvens desencadeia-se por vários mecanismos:

- Quando o ar arrefece abaixo do ponto de saturação ao entrar em contacto com superfícies frias. Esta situação pode ocorrer:
 - § Ao longo de frentes quentes e frentes frias;
 - § Quando o ar sobe a encosta de montanhas;
 - § Por convecção;
 - § Quando correntes de ar quente passam por superfícies frias;
- Quando duas massas de ar que estejam abaixo do ponto de saturação se misturam;
- Quando o ar se mantém à mesma temperatura mas absorve mais vapor de água antes de atingir o ponto de saturação.

Como será de esperar as nuvens não têm uma condição muito estável, tendo em conta que são compostas por pequenas gotas de água que estão em constante modificação de estado. Se há gotas que se formam outras evaporam-se. Esta situação de instabilidade no interior das nuvens, incentivadas pelo aquecimento solar, causa situações de turbulência acrescida que pode influenciar as condições de propagação.

A Tabela 2-2 apresenta os diferentes tipos de nuvens e como são agrupados para além de uma breve descrição sobre cada um deles. São referidos os tipos de nuvens que têm maior influência na propagação, ou seja, são suficientemente baixas e/ou podem ter um conteúdo de água significativo. Algumas das imagens que compõem a Tabela 2-2 foram retiradas dos seguintes locais da internet:

- http://scijinks.jpl.nasa.gov/en/educators/gallery/clouds_atmos
- <http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Atmosphere/clouds/>






Tipo de Nuvem	Descrição	Exemplo
Nuvens de formação vertical		
Cumulus / Cumulonimbus	Têm um grande desenvolvimento vertical estendendo-se desde 1Km de altura até por vezes 10Km. A sua presença pode levar a aguaceiros fortes, neve e a trovoadas. O topo assume por vezes a forma de bigorna que contém essencialmente gelo.	
Nuvens Altas		
Cirrocumulus	Tem aparência de pequenas bolas de algodão em rama e aparecem em longas linhas. Não estão associadas a precipitação.	
Nuvens Médias		
Alto cumulos	Estão à mesma altitude da altostratus no entanto são mais espessas. Podem anunciar trovoadas.	
Nuvens Baixas		
Stratocumulos	É uma formação muito baixa e substancialmente densa. Raramente ocorre precipitação.	
Nimbostratus	Apresentam um aspecto bastante escuro e estão quase sempre associadas à ocorrência de precipitação, que pode ser mais ou menos contínua. A intensidade dessa chuva é ligeira a moderada.	

Tabela 2-2 – Resumo de alguns tipos de nuvens e sua descrição.

2.2.4 Precipitação

A precipitação é a designação dada na meteorologia à queda de partículas de água (hidrometeoros) e ocorre numa das seguintes formas: neve, chuva, gelo (granizo, saraiva) [11].

A formação de precipitação pode dar-se a partir três processos:

- ◆ Condensação – o desenvolvimento de precipitação inicia-se com a subida de massas de ar quente. À medida que o ar arrefece, o vapor de água condensa e dá origem ao aparecimento de nuvens. Quando as gotas de água nas nuvens atingem peso suficiente a sua queda inicia-se.
- ◆ Coalescência – a base deste processo de formação de precipitação deve-se à união de gotas de água dando origem a gotas maiores. Quando atingem um volume suficiente para superarem a resistência do ar inicia-se a precipitação. Este tipo de precipitação é mais frequente em nuvens com temperatura superior a 0°C (climas tropicais).
- ◆ Bergeron – a precipitação originada a partir deste processo deve-se à criação de cristais de gelo que adquirirem moléculas de água de gotas bastante frias. Este processo é dependente da temperatura pois estas gotas bastante frias só existem em nuvens com temperatura inferior a 0°C. Quando os cristais de gelo atingem uma massa suficiente para iniciarem a queda, podem derreter e passar a gotas de água.

Existem dois tipos de principais de precipitação:

- ◆ Estratiforme – ligeira, mas duradoura, com origem em nuvens de desenvolvimento horizontal que cobrem uma vasta área.
- ◆ Convectivas – intensa mas numa área limitada e com origem em nuvens de grande desenvolvimento vertical (cumulo-nimbos e cumulus) que dão origem a aguaceiros fortes mas passageiros. Este tipo de precipitação é raro no nosso clima e em Aveiro apenas uma vez foi registado um valor da taxa de precipitação superior a 115mm/h.

As gotas de chuva são caracterizadas por uma distribuição de tamanhos. As gotas mais pequenas são as mais abundantes e tem uma forma esférica contudo, com o aumento do tamanho, tendem a assumir uma forma de um esferóide oblato, Figura 2-2 [12]. A forma pode ser calculada levando em consideração o balanço entre as forças aerodinâmicas da queda e a tensão superficial.

As gotas caem, num ambiente com um gradiente na velocidade do vento em altitude, com um ângulo de inclinação relativamente à vertical o qual deve ser levado em conta, juntamente com a geometria da ligação, para avaliar a atenuação e despolarização [13], [14].

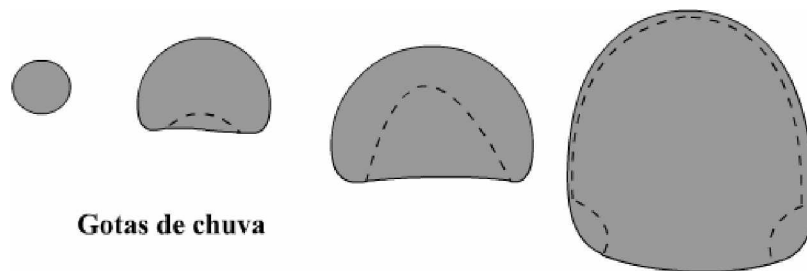


Figura 2-2 – Formas das gotas de água de chuva.

A taxa de precipitação é medida em mm/h (altura de água que seria acumulada ao fim de uma hora de chuva contínua). O parâmetro meteorológico é normalmente medido através de pluviómetros de balde ou de conta gotas, embora já se encontrem no mercado outros sensores (ópticos). Os pluviómetros de balde fornecem uma informação mais grosseira da taxa de precipitação que o pluviómetro de conta gotas. A estação está equipada com um pluviómetro conta gotas (oferece uma resolução de 0.6mm/h) e um pluviómetro de balde (12mm/h). As medidas são efectuadas com um tempo de integração de 1 minuto (recomendado para estas aplicações).

2.3 Fenómenos de propagação

Os factores meteorológicos abordados anteriormente influenciam, de forma determinante, o comportamento de um sinal de microondas que se propaga através da atmosfera terrestre. Os seguintes fenómenos de propagação são os mais relevantes para uma ligação Terra-Satélite:

- Atenuação;
- Despolarização;
- Cintilação.

As características destes fenómenos é influenciada, como será de esperar, pela climatologia do local onde o sistema de recepção está instalado. No entanto, para além dos factores meteorológicos, também os parâmetros da ligação Terra-Satélite deverão ser considerados nomeadamente:

- Ângulo de elevação da antena;
- Ângulo de azimuth;
- Ângulo de inclinação da polarização;
- Diâmetro da antena do receptor.

Os parâmetros da ligação, juntamente com dados meteorológicos medidos preferencialmente no local, formam o conjunto de dados de entrada para vários modelos de previsão dos principais fenómenos de propagação.

2.3.1 Atenuação

A atenuação é um dos fenómenos de maior impacto em sistemas de telecomunicações e tem origem em: gases, vapor de água, nuvens e chuva. A atenuação específica devido a gases é inferior à causada pela precipitação, no entanto, deve ser levada em conta nos sistemas de baixa margem de atenuação e nunca esquecendo que se poderá tornar significativa para ligações com baixo ângulo de elevação.

A atenuação depende da frequência, ângulo de elevação, altitude do local e da densidade do vapor de água [15].

O cálculo da atenuação devido a gases pode ser efectuado a partir da Eq.2-5, onde $A_o = h_o \cdot \gamma_o$ e $A_w = h_w \cdot \gamma_w$ são respectivamente a atenuação no zénite devido ao oxigénio e vapor de água respectivamente[16].

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \vartheta} \quad \text{Eq.2-5}$$

Os parâmetros h_o (altura equivalente para o oxigénio, em km), γ_o (atenuação específica do oxigénio, em dB/km), h_w (altura equivalente para o vapor de água, em km), γ_w (atenuação específica do vapor de água, em dB/km) podem ser calculados usando a recomendação ITU-R P.676-5.

Caso se pretenda utilizar o valor do conteúdo de vapor de água integrado é usada a Eq.2-6.

$$A(p) = \frac{A_o + A_w(p)}{\sin \vartheta} \quad \text{Eq.2-6}$$

Sendo que $A_w(p)$ pode ser obtido a partir da Eq.2-7 onde $V_t(p)$ (kg/m² ou mm), ρ (g/m³) e γ_w (dB/km) são respectivamente o conteúdo integrado de vapor de água excedido durante uma percentagem de tempo p , o valor médio da densidade do vapor de água à superfície e a atenuação específica do vapor de água.

$$A_w(p) = \frac{V_t(p) + \gamma_w(p)}{\rho} \quad \text{Eq.2-7}$$

A Figura 2-3 mostra a atenuação específica devido ao oxigénio e vapor de água para o intervalo de frequências entre 1 e 350GHz em condições PTN.

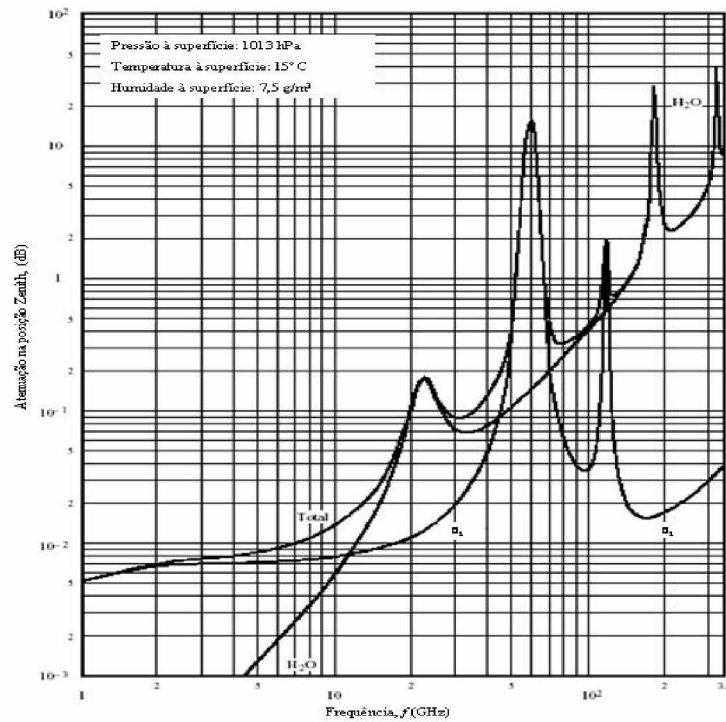


Figura 2-3 – Atenuação zenital do oxigénio e vapor de água em condições PTN.

Neste intervalo de frequências a atenuação apresenta um pico a 22.2GHz devido a frequência de ressonância da molécula de vapor de água e um pico nos 60GHz devido a um complexo ressonante da molécula de oxigénio.

As nuvens e o nevoeiro são compostos por pequenas gotas de água que se podem assumir *scatters* de Rayleigh. Assim a atenuação na banda Ka deve-se essencialmente ao fenómeno de absorção e será exclusivamente proporcional à quantidade de água por m³. A atenuação tem maior relevo para frequências muito elevadas (acima de 100GHz) e para locais cujo ângulo de elevação é pequeno [17].

A atenuação específica devido a nuvens e/ou nevoeiro (dB/km) pode ser obtida a partir da Eq.2-8, onde K_l é a atenuação específica por densidade de água no meio (dB/km)/(g/m³) e M é a densidade de água líquida nas nuvens ou nevoeiro (g/m³).

$$\gamma_c = K_l M \quad \text{Eq.2-8}$$

O cálculo de K_l , Eq.2-9, tem como base a aproximação de Rayleigh que, neste caso, é válida para frequências até 200GHz.

$$K_l = \frac{0.819 \cdot f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad \text{Eq.2-9}$$

Onde f corresponde à frequência (GHz) e ε é a permitividade complexa da água sendo:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad \text{Eq.2-10}$$

O valor de ϵ pode ser obtido a partir do modelo de Debye apresentado na recomendação ITU-R P.840-3 Anexo 1.

A Figura 2-4 apresenta a variação do valor de K_l em função da frequência entre 5 e 200GHz para temperaturas entre -8°C e 20°C.

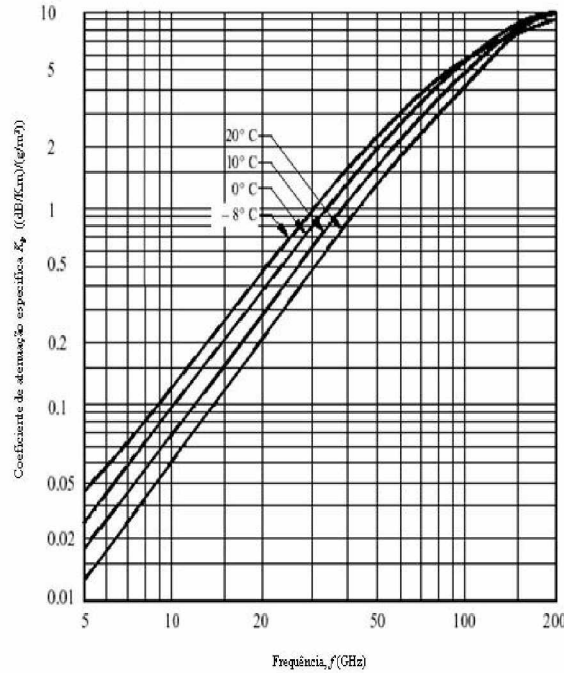


Figura 2-4 – Coeficiente da atenuação específica devido a pequenas gotas de água.

O valor da atenuação específica das nuvens pode também ser obtida a partir do modelo de propagação de Liebe, Eq.2-11 [18],

$$\gamma_c = 0.182 \cdot f \cdot N_w''(f) \quad \text{Eq.2-11}$$

onde f representa a frequência (GHz) e N_w'' é a parte imaginária do índice de refração complexo em ppm (10^{-6}) da água dado pela Eq.2-12.

$$N_w'' = \frac{9}{2} \frac{M}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad \text{Eq.2-12}$$

Para se obter o valor da atenuação devido a nuvens, pode recorrer-se à Eq.2-13 que utiliza como variáveis de entrada a quantidade de água total L (Kg/m²) e o ângulo de elevação entre $90^\circ \geq \vartheta \geq 5^\circ$ e K_l [17]. A determinação da atenuação devido a nuvens é difícil de obter

experimentalmente com auxílio de balizas de satélite. A utilização de um radiómetro é recomendada para este efeito.

$$A = \frac{L \cdot K_l}{\sin \vartheta} \quad \text{Eq.2-13}$$

A atenuação devido a precipitação é a mais significativa para a maioria das ligações em trajectória inclinada [19]. A diminuição da amplitude do sinal deve-se à absorção de energia e ao espalhamento originado pelas gotas de chuva.

A atenuação devido a precipitação é modelada com base na frequência, ângulo de elevação, ângulo de polarização e intensidade da precipitação. Os modelos existentes baseiam-se na teoria de *scattering* simples que recorre à distribuição do tamanho, forma e temperatura das gotas de chuva.

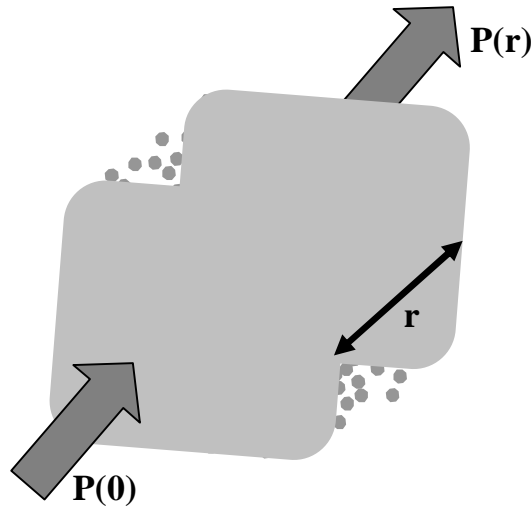


Figura 2-5 – Diagrama ilustrativo de um sinal de potência P a atravessar uma célula de chuva.

Considerando-se a Figura 2-5 podemos usar a Eq.2-14 para o cálculo da atenuação.

$$P(r) = P(0) \cdot e^{-\alpha \cdot r} \quad \text{Eq.2-14}$$

A variável α designa a constante de atenuação através de uma população de gotas de diâmetro D com uma determinada distribuição de tamanhos, Eq.2-15.

$$\alpha = \int_0^{\infty} N(D) \cdot C(D) dD \quad \text{Eq.2-15}$$

Nesta equação:

- $N(D)$ é densidade de gotas (número de gotas por m^3 com diâmetro entre D e $D+dD$);
- $C(D)$ é um parâmetro de scattering da gota.

O valor de $N(D)$ pode ser dado através das distribuições aproximadas de Marshall e Palmer e Joss e Waldvogel entre outras. Estas distribuições são representadas por equações do tipo:

$$N(D) = N_0 \exp^{(-\Lambda \cdot D)}, \quad \text{Eq.2-16}$$

onde N_0 é uma constante e Λ é uma função dependente da taxa de precipitação R . Na Tabela 2-3 são dados os valores dos parâmetros referidos para alguns tipos de distribuição [20].

Tipo de Distribuição	$N_0 [\text{mm}^{-1} \text{ m}^3]$	$\Lambda [\text{mm}^{-1}]$
Marshall & Palmer	8000	$8.2R^{-0.21}$
Joss Drizzle	3000	$11.4R^{-0.21}$
Joss Thunderstorm	1400	$6R^{-0.21}$

Tabela 2-3 – Valores dos parâmetros para distribuição de tamanho de gotas.

A constante de propagação depende da polarização da onda e, normalmente, são tomadas como referência duas polarizações lineares ortogonais ao longo das quais uma onda não sofrerá despolarização. Um meio nestas condições – longitudinalmente homogéneo e composto de gotas equi-alinhadas - diz-se possuir planos principais. Os planos principais são ortogonais e um deles contém a direcção de propagação e o eixo de simetria das gotas.

O conhecimento da micro-estrutura da precipitação ao longo do trajecto é praticamente impossível. O relacionamento da atenuação com dados meteorológicos mais generalistas (taxa de precipitação, tamanho e forma da célula de chuva, etc) é essencial para o desenvolvimento de modelos. Para modelar a atenuação são usadas estatísticas da taxa de precipitação R no local onde o sistema de recepção está instalado. Pode-se usar como um modelo simples de atenuação a seguinte equação [21]:

$$A = a \cdot R^b \cdot L_e \quad \text{Eq.2-17}$$

A variável L_e representa o percurso entre receptor e o topo da célula de chuva que normalmente é assumido à isotérmica de 0°C . O cálculo de L_e , que naturalmente dependerá da geometria da ligação e das próprias dimensões da célula de chuva, é apresentado na recomendação ITU-R P.618-8 Anexo1.

Os restantes factores que compõem a Eq.2-17 correspondem ao valor da atenuação específica devido a chuva (γ_r) [22]. Os coeficientes a e b dependem da frequência e do ângulo de polarização e podem ser calculados a partir das equações 2 e 3 da recomendação ITU-R P.838-2.

A Figura 2-6 ilustra vários episódios consecutivos de atenuação devido a chuva durante o dia 23 de Novembro de 2006. Um desses eventos tem atenuação de 30dB (bastante expressiva) que mostra como a precipitação pode provocar uma profunda atenuação do sinal.

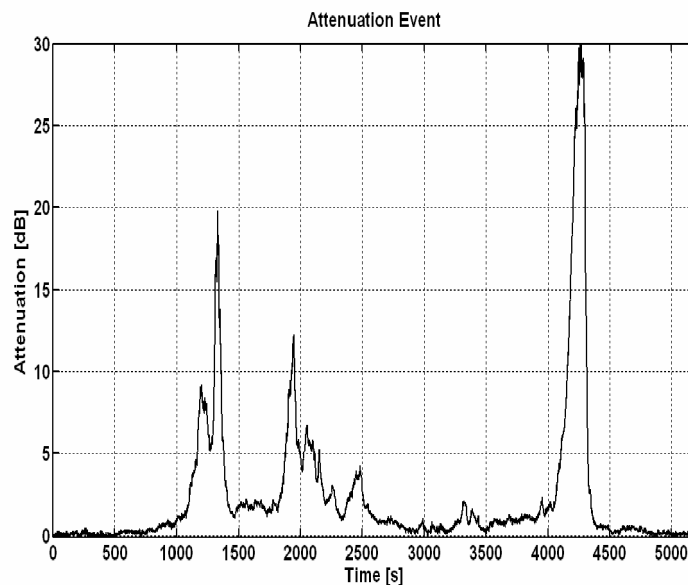


Figura 2-6 – Evento de atenuação devido a precipitação (23 de Novembro de 2006).

A Figura 2-7 mostra o resultado das estatísticas cumulativas de atenuação obtidas durante vinte e oito meses de dados com o sistema que será descrito no capítulo 4. No mesmo gráfico está ilustrado o resultado das estatísticas cumulativas da atenuação obtidas a partir do modelo ITU-R P.618-8.

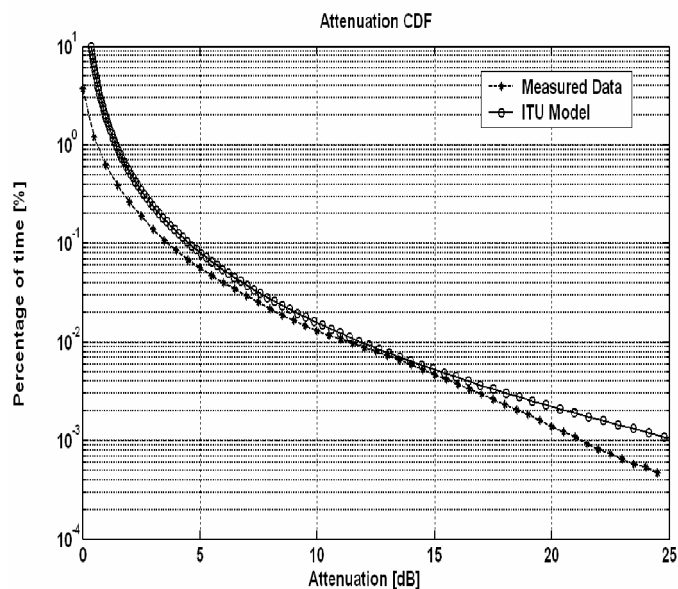


Figura 2-7 – Estatísticas cumulativas da atenuação: 28 meses.

Estes resultados referem-se praticamente a atenuação por chuva com alguma contribuição de nuvens, mas claramente não inclui a atenuação por gases. Tendo em conta que o período a que reportam as medidas foi anormalmente seco é, por enquanto, perfeitamente justificado o desvio por defeito em relação ao modelo [23].

2.3.2 Despolarização

Um sinal ao propagar-se no seio de uma população anisotrópica e com uma polarização não alinhada com um dos planos principais sofre despolarização. Isto é, parte da sua potência é transferida para a polarização ortogonal. Define-se assim uma grandeza denominada discriminação da polarização cruzada (XPD). Esta grandeza pode ser obtida a partir da Eq.2-18 para um meio longitudinalmente homogêneo com planos principais, para uma anisotropia D_{Anis} e para um ângulo de inclinação da polarização ϕ [23]:

$$XPD = \frac{-\tanh(D_{Anis}/2) \cdot \sin(2\phi)}{1 - \tanh(D_{Anis}/2) \cdot \cos(2\phi)} \cong -\frac{D_{Anis}}{2} \sin(2\phi). \quad \text{Eq.2-18}$$

A anisotropia (complexa) é a diferença integrada ao longo do percurso das constantes de propagação nos planos principais. A anisotropia, para uma população de chuva, é predominantemente imaginária para gotas pequenas e frequências baixas, mas a parte real cresce em importância com o tamanho da gota e frequência [20].

A despolarização pode também ser provocada por nuvens de gelo acima da isotérmica de 0°C. O crescimento destes cristais ocorre através da deposição de vapor de água, captura de gotas de água ou a agregação de outros cristais de gelo. Os cristais de gelo podem ter várias formas com uma geometria pouco regular. A forma destes cristais é dependente da temperatura e da saturação do vapor de água no local onde foram criados.

O aparecimento de gelo no meio de propagação é normalmente associado a nuvens do tipo estratos, nuvens cúmulo-nimbos com actividade eléctrica ou com nuvens cúmulo-nimbos com um grande desenvolvimento vertical. Os eventos de gelo são relativamente comuns no nosso local e observáveis regra geral sempre que ocorre a passagem de uma frente fria.

O gelo não causa atenuação significativa pois o índice de refração do gelo é essencialmente real. A anisotropia será assim essencialmente imaginária pelo que um diagrama polar do XPD revela a natureza do fenómeno (vector junto a $\pm 90^\circ$).

Foi já verificado que quando ocorrem descargas eléctricas na atmosfera (trovoada) - Figura 2-8 -, os cristais de gelo podem sofrer realinhamentos devido ao intenso campo eléctrico desenvolvido, dando origem a súbitas variações do XPD quando estes campos desaparecem. No caso aqui referido as variações bruscas sucederam-se sensivelmente a cada 50 segundos.

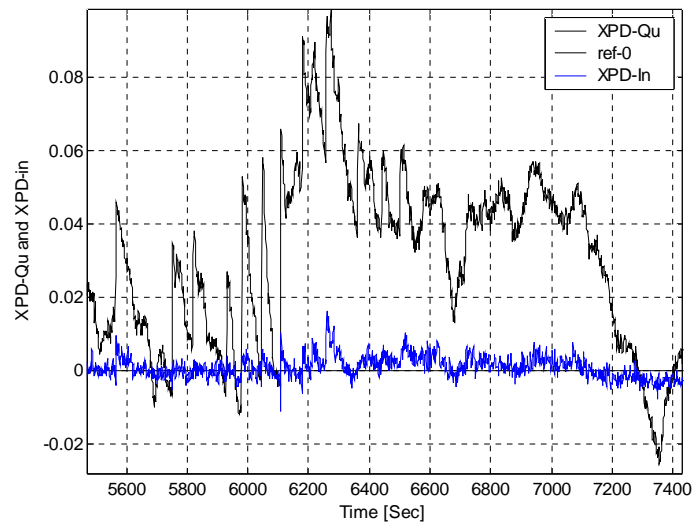


Figura 2-8 – XPD em quadratura: Período de intensa trovoadas (14 Junho 2006).

A Figura 2-9 ilustra as estatísticas conjuntas entre o XPD-quadratura e a atenuação. A partir deste resultado, pode-se concluir que para atenuações inferiores a 6dB o XPD-quadratura tem uma contribuição significativa para a discriminação da polarização cruzada. A apresentação de valores positivos e negativos indica a existência de uma população de gelo com uma orientação muito variável em contraste com populações de gotas de chuva. Para atenuação superior a 8dB verifica-se que o XPD-quadratura se torna positivo e com uma melhor correlação com a atenuação, sendo a chuva o factor de despolarização dominante [23].

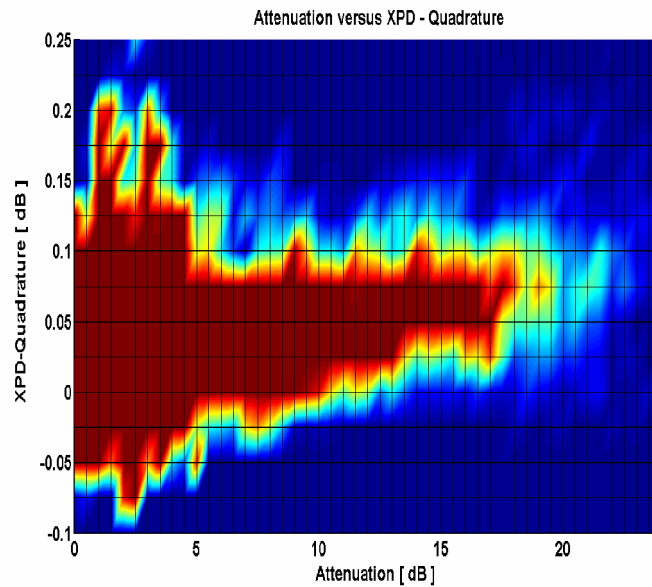


Figura 2-9 – XPD-Quadratura versus Atenuação do copolar.

2.3.3 Cintilação

A cintilação não é um fenómeno de absorção (como a atenuação): caracteriza-se por flutuações do sinal em volta de um valor médio que é normalmente calculado de 1 em 1 minuto. O sinal apresenta períodos de maior amplitude (*enhancements*) e outros com menor amplitude (*fades*).

A cintilação é causada por variações do índice de refração no trajecto que ocorrem em períodos de turbulência atmosférica e que se devem à variação temporal/espacial da temperatura e da humidade relativa. Estas irregularidades – podemos vê-las como lentes focando ou desfocando – causam uma perturbação em fase e amplitude da frente de onda, que se acabam por traduzir em variações de amplitude do sinal recebido.

A cintilação tem especial importância em sistemas de baixa margem VSATs pelo facto de juntamente com a atenuação devido a chuva, nuvens e gases, levar à degradação da relação sinal ruído condicionando a disponibilidade e qualidade de serviço [20] e [24]. Em algumas situações, a cintilação chega a ser mais importante que a atenuação devido a precipitação, não podendo ser ignorada em alguns sistemas de telecomunicações.

O fenómeno também tem um impacto significativo em sistemas com o ângulo de elevação baixo. Foram feitos alguns estudos sobre esta dependência, como por exemplo, os realizados por E. Vilar [25] e por S. Jones [26]. Nestes casos o ângulo de chegada à antena, devido à refração, pode ter uma contribuição significativa.

Estas flutuações rápidas introduzem também sérias dificuldades em sistemas de seguimento de antena, controlo de potência de *uplink* e em sistemas de mitigação de atenuação [27].

3 Cintilação: Caracterização e modelização

Inicialmente, o fenómeno foi observado na luz visível como a cintilação das estrelas. Mais tarde, veio a verificar-se que a cintilação estava ligada à turbulência atmosférica [28].

O estudo do fenómeno de cintilação teve como precursores fundamentais Tatarski e, mais tarde, Ishimaru. Nos seus estudos, aplicaram a teoria de turbulência atmosférica analisando as flutuações de um sinal que se propaga na atmosfera. No entanto, só alguns anos mais tarde e pela mão de Hinder e Yokoi [29], é que se observou a cintilação troposférica nas microondas.

Posteriormente, com base em inúmeras experiências em ligações Terra-Satélite, foram desenvolvidos alguns modelos.

Os modelos de cintilação têm como base os estudos desenvolvidos por Tatarski. A teoria da cintilação baseia-se num modelo da dinâmica dos fluidos para flutuações da velocidade num meio turbulento, proposto por Kolmogorov.

O estudo do fenómeno permite avaliar o impacto numa ligação Terra-Satélite, sendo de extrema importância no dimensionamento de sistemas operando com baixo ângulo de elevação, sistemas com reduzida SNR, em sistemas de localização geográfica (cintilação na Ionosfera), entre outros.

3.1 Caracterização teórica

O fenómeno de cintilação consiste em variações rápidas do sinal em torno de um valor médio. Estas variações são causadas pelo deslocamento de massas de ar turbulentas onde ocorrem variações de pressão, humidade e temperatura que se traduzem em variações aleatórias do índice de refração ao longo do trajecto percorrido pela onda electromagnética. A caracterização física da atmosfera nestas condições é essencialmente um problema da física de fluidos. Podemos constatar a complexidade destes fenómenos observando o escoamento, a grande velocidade, da água de um rio ao redor de um obstáculo: dentro de uma deslocação com uma direcção e sentido evidentes constata-se a existência de irregularidades/turbilhões locais que, por sua vez, contém outras de menor dimensão, etc. Após alguma distância, a energia destes turbilhões dissipa-se e o deslocamento é essencialmente uniforme.

Do ponto de vista de uma onda, podemos considerar essas irregularidades como lentes convexas/côncavas que focam/desfocam o sinal na antena. Numa perspectiva óptica a antena está a ser banhada por sucessivas manchas de “luminosidade” acima da média (reforços) e “penumbra” (cancelamentos).

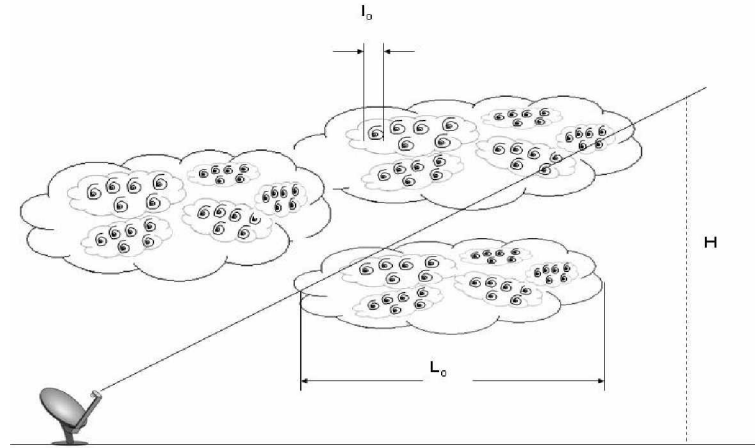


Figura 3-1 – Ligação que atravessa um meio turbulento.

3.1.1 O espectro de Kolmogorov

Esta teoria tem subjacente a caracterização da turbulência em grandes volumes de ar como tendo dois tamanhos: uma escala de turbulência exterior - L_o - que pode atingir alguns quilómetros e a escala de turbulência interior - l_o - que pode ser tão reduzida quanto alguns mm [30]. Assim, podemos definir três regiões distintas:

- *Input range* (tamanho das irregularidades $>L_o$) - a energia fornecida à turbulência nesta região, deve-se essencialmente à presença de ventos e ao gradiente de temperatura (por exemplo uma subida de uma bolha de origem térmica). Neste caso a turbulência não tem nenhuma descrição matemática pois depende muito da forma como é originada, sendo geralmente anisotrópica.
- *Inertial subrange* (tamanho das irregularidades entre L_o e l_o) - nesta região, a energia cinética dos redemoinhos sobrepõe-se à dissipada por viscosidade. A turbulência nesta sub-região pode ser definida como sendo isotrópica, tendo um espectro proporcional a $K^{-11/3}$, onde $K=2\pi/$ (tamanho do redemoinho).
- *Dissipation range* ($l_o >$ tamanho das irregularidades) - nesta região a dissipação de energia deve-se essencialmente à viscosidade e o espectro da turbulência é extremamente baixo.

Tendo em conta as três regiões consideradas anteriormente, o espectro de Kolmogorov pode ser definido pela Eq.3-1.

$$\begin{cases} \text{desconhecido} & , \quad K < 2\pi / L_o \\ \Phi_n(K) \approx 0 & , \quad 2\pi / l_o < K \\ \Phi_n(K) = 0.033 \cdot C_n^2 \cdot K^{-11/3} & , \quad 2\pi / L_o < K < 2\pi / l_o \end{cases} \quad \text{Eq.3-1}$$

Onde Φ_n representa a função de densidade espectral das flutuações do índice de refração, de um meio e C_n é o denominado parâmetro estrutural das variações do índice de refração, que

varia ao longo do trajecto. Este parâmetro varia entre 10^{-10} e $10^{-20} \text{ m}^{-2/3}$ e os locais onde tende a ser mais elevado é junto à Terra e nas nuvens. É obtido de uma forma semi empírica, pois depende de vários factores atmosféricos e da altura [2].

3.1.2 Variância

A flutuação do sinal recebido devido à variação do índice de refração pode ser caracterizada pela sua variância. A teoria supõe o perfil do índice de refração “congelado” no espaço a cruzar a antena com uma velocidade transversal à ligação dada por v_t . Para o caso de um receptor pontual, um percurso L com turbulência homogénea e em condições de fraca flutuação (aproximação de Rytov) a variância é dada pela Eq.3-2, onde k representa o número de onda [2].

$$\sigma^2 = 23.16 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6} \quad [dB^2] \quad \text{Eq.3-2}$$

De uma forma genérica a contribuição de cada camada exigirá que seja conhecido o valor de C_n em cada ponto. A variância observada por um receptor pontual é seguramente mais elevada que a observada por uma antena de abertura. Uma antena com abertura considerável deverá integrar todas as contribuições do sinal recebido sobre uma área maior efectuando, de certa forma, uma filtragem. Haddon e Vilar [31], através de um modelo simplificado de uma antena de abertura, chegaram a uma função que define o factor de suavização da abertura da antena - $g(D_e)$.

$$g(D_e) = \sqrt{3.8637 \cdot (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left[\frac{11}{6} \cdot \arctan\frac{1}{x}\right] - 7.0835 \cdot x^{5/6}} \quad \text{Eq.3-3}$$

O parâmetro $x = 0.0584 \cdot k \cdot D_e^2 / z$ representa a relação entre o diâmetro efectivo da antena D_e (Eq.3-4) e o tamanho do primeiro elipsóide de Fresnel $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot z / k}$ onde z é a distância entre o receptor e a camada turbulenta.

$$D_e = D \cdot \sqrt{\eta} \quad , \quad \text{onde } \eta \text{ representa a eficiência da antena} \quad \text{Eq.3-4}$$

A Eq.3-3 pode ser simplificada no caso de $x \ll 1$ para:

$$g(D_e) \approx \sqrt{1 - 7.0835 \cdot x^{5/6}} \quad \text{Eq.3-5}$$

O valor da distância entre a camada turbulenta e o receptor é dado pela Eq.3-6.

$$z = \frac{2 \cdot h}{\sqrt{\sin^2 \vartheta + 2 \cdot h / a_e} + \sin \vartheta} \quad , \quad \text{onde } a_e \text{ é o raio efectivo da Terra} \quad \text{Eq.3-6}$$

A justificação física deve-se ao facto de uma antena de dimensão finita estar de facto a adicionar ou efectuar uma média sobre a frente de onda na abertura onde poderão coexistir “reforços” e “cancelamentos” por distintos “volumes turbulentos” no espaço. Sobre a abertura de

uma antena de dimensão muito superior ao elipsóide de Fresnel observam-se de facto perturbações com origem em distintas zonas do espaço.

3.1.3 Espectro

O espectro da cintilação foi derivado para uma antena pontual por Ishimaru, a partir também da teoria de Kolmogorov, Eq.3-7. Para a situação em que se tem $2\pi / L_o < K < 2\pi / l_o$, Ishimaru considerou duas regiões distintas:

$$\left\{ \begin{array}{ll} W^0(\omega) = 2.765 \frac{\sigma^2}{\omega_t} & \omega \rightarrow 0 \\ W^\infty(\omega) = 7.13 \sigma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_t} \right)^{-8/3} & \omega \rightarrow \infty \end{array} \right. , \omega_t = v_t \sqrt{k/L} \quad \text{Eq.3-7}$$

No caso de $\omega \rightarrow 0$ o espectro da cintilação é aproximadamente constante, no entanto, com o aumento da frequência verifica-se um decréscimo. Este decréscimo dá-se com um declive teórico de $f^{-8/3}$ [32]. O ponto de intercepção das duas rectas originadas pela Eq.3-7 representa a denominada frequência de canto - $\omega_c = 1.43 \cdot v_t \sqrt{k/L}$. Este valor dependerá da velocidade transversal do vento - v_t , comprimento de onda e distância. Para uma velocidade de 10m/s a 20GHz e na situação da presente ligação teremos cerca de 0.9Hz.

A Figura 3-2 apresenta um exemplo do espectro de potência de um evento de cintilação com intensidade considerável dentro da nossa base de dados. Este evento particular tem uma frequência de canto de aproximadamente $f_c = 0.8\text{Hz}$.

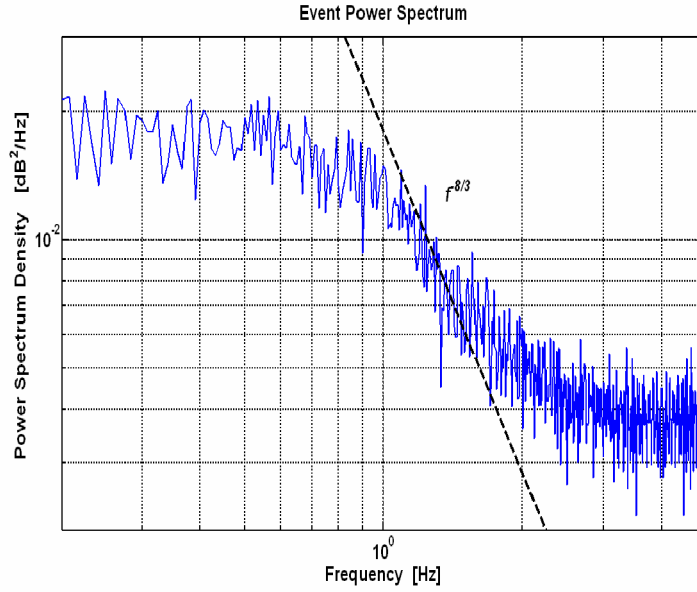


Figura 3-2 – Densidade espectral de potência de um evento do dia 13-05-2005.

Os resultados referentes a um receptor pontual foram usados como base para o cálculo da densidade espectral de potência da cintilação para uma antena de diâmetro D [31]. Os resultados obtidos, apresentados na forma normalizada a uma antena pontual ($D=0$), são dados na equação seguinte:

$$\begin{cases} \frac{W^0(\omega, D)}{W^0(\omega, 0)} = \frac{14}{3} x^{4/3} - 2(1+x^2)^{7/6} \sin\left[\frac{7}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{x}\right)\right] & \omega \ll \omega_0, l_0 < D < L_0 \\ \frac{W^\infty(\omega, D)}{W^\infty(\omega, 0)} = 1.053 \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right) \exp(-\omega^2/\omega_s^2) & \omega \gg \omega_s, \omega \gg \omega_0 \end{cases} \quad \text{Eq.3-8}$$

Onde $\omega_s = 4.1391 \cdot v_t / D$ depende também da velocidade transversal do vento e do diâmetro efectivo da antena. A partir de um determinado valor de ω_s , o espectro da cintilação vem condicionado ao diâmetro da antena, implicando um aumento do declive do espectro de cintilação.

Nas condições referidas anteriormente teríamos como um valor indicativo $f_s=4.4\text{Hz}$. A nossa relação SNR é claramente insuficiente para observar este efeito se atendermos que o evento apresentado na Figura 3-2 é já um evento com razoável intensidade.

3.1.4 Escalonamento da variância

A necessidade de comparar resultados experimentais com os obtidos em outros locais para frequências, diâmetro da antena e geometria da ligação distintas, é uma necessidade no desenvolvimento de modelos.

O estudo da dependência com a frequência pode ser feito a partir da relação da variância da cintilação obtida no mesmo local, Eq.3-9 [33], a frequências distintas. Aquela equação leva em

linha de conta, para além da relação da frequência, também a relação do ângulo de elevação e do tamanho da antena. O valor da variável a pode ser obtido a partir do declive dos dados de regressão efectuados às distribuições conjuntas da variância [34]. O modelo ITU-R sugere para o valor de a 7/6, que deriva directamente da Eq.3-2, no entanto Karasawa obteve um valor ligeiramente menor a partir dos resultados da sua campanha experimental ($a=0.9$). O expoente a varia de local para local, e não parece estar relacionado com nenhum parâmetro meteorológico nem de sistema. No entanto, esta variação pode-se dever ao facto da cintilação associada a nuvens ter uma dependência da frequência diferente da cintilação originada em céu limpo.

$$\frac{\sigma_1^2(f_1)}{\sigma_2^2(f_2)} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^a \left(\frac{\sin \vartheta_1}{\sin \vartheta_2}\right)^{2.4} \left(\frac{g^2(D_{e1})}{g^2(D_{e2})}\right) \quad \text{Eq.3-9}$$

Para ângulos de elevação menores o valor da amplitude da cintilação aumenta. Este aumento deve-se ao facto do sinal recebido percorrer uma maior distância em zonas de turbulência.

3.2 Distribuição da amplitude χ

As flutuações do nível de sinal observadas em eventos de cintilação de curta duração têm, quando condicionadas à variância ou desvio padrão σ_χ , uma distribuição gaussiana [2]. Pode-se então caracterizar o fenómeno de cintilação através da variância σ^2 . Tendo em conta este comportamento estatístico do fenómeno, a densidade de probabilidade da amplitude de cintilação χ é dada por:

$$p(\chi|\sigma_\chi) = \frac{1}{\sigma_\chi \sqrt{2\pi}} e^{-\chi^2 / 2\sigma_\chi^2} \quad \text{Eq.3-10}$$

No entanto foi verificado por Vilar e Banjo que em situações de cintilação mais intensa a distribuição do nível de sinal se afastava da distribuição Gaussiana. Este desvio deve-se ao facto de, durante períodos de cintilação mais intensa, os cancelamentos (*fades*) terem uma amplitude superior aos incrementos de sinal (*enhancement*).

A cintilação de maior intensidade poderá estar relacionada com a turbulência no interior de nuvens [35]. Nestas condições o fenómeno de cintilação poderia ser descrito como sendo o somatório de todas as contribuições de espalhamento de um sinal que atravessa uma camada fina (*thin layer*) turbulenta distante do receptor. Partindo deste pressuposto, van de Kamp considerou que a distribuição que melhor caracteriza as flutuações do nível de sinal, em períodos de cintilação, seria a distribuição de Rice-Nakagami. Esta distribuição tem em conta o facto do sinal sofrer espalhamento devido a pequenos turbilhões existentes nessa camada turbulenta [36]. A distribuição deixa de ser simétrica para apresentar uma maior probabilidade de um determinado *fading*

relativamente a um *enhancement* com a mesma amplitude. Um dos parâmetros da distribuição é então função do próprio desvio padrão σ .

3.3 Distribuição do desvio padrão σ_χ

O desvio padrão a longo prazo é ele próprio uma variável aleatória. Mouldsley e Vilar verificaram que uma boa aproximação para a distribuição do desvio padrão (e variância) da cintilação é a distribuição log-normal [2]:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} \sigma_1 \sigma} e^{-\frac{(\log \sigma - m_1)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad m_1 = \text{mean}(\log \sigma), \sigma_1 = \log \sigma. \quad \text{Eq.3-11}$$

Karasawa, por seu turno, apresentou outra aproximação para a distribuição do desvio padrão da cintilação: a distribuição Gama. Da mesma forma, a distribuição da variância da cintilação também pode ser aproximada pela distribuição Gama.

$$p(\sigma) = \frac{(a/m_\sigma)^a}{\Gamma(a)} \sigma^{a-1} e^{-a\sigma/m_\sigma} \quad \text{Eq.3-12}$$

onde:

$$a = m_\sigma^2 / \sigma_\sigma^2, \quad m_\sigma = \text{média de } \sigma, \sigma_\sigma = \text{desvio padrão de } \sigma$$

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx, \quad \Gamma() = \text{função Gama}$$

3.4 Observações de cintilação

As condições meteorológicas ao longo do caminho, apesar de serem importantes, não podem ser obtidas em tempo real ao longo de toda a ligação pelo que, para efeitos de modelamento, teremos normalmente que nos restringir a medições pontuais em estações meteorológicas locais.

A Temperatura e a Humidade, que como se irá verificar condicionam de forma clara o índice de refração, deverão apresentar alguma correlação com a intensidade de cintilação. O índice de refração atmosférico à superfície devido ao vapor de água, normalmente designado por N_{wet} , é por excelência a variável mais utilizada na modelação da cintilação. Experimentalmente, verifica-se uma boa correlação a longo prazo entre este parâmetro e a intensidade de cintilação. Este valor pode ter distintas fórmulas de cálculo dependendo de quem efectua o estudo, como se poderá constatar no capítulo 3.6.

Tervonen [28] concluiu que, para além da variação diurna da intensidade de cintilação provocada pelos dois factores acima referidos, também a presença de nuvens evidencia uma

elevada correlação com a intensidade de cintilação. Segundo este investigador, as nuvens do tipo cúmulos (situadas a baixa altitude) contribuem de forma muito significativa para a intensidade da cintilação. Esta dependência deve-se ao facto das condições acrescidas de humidade e aquecimento solar que se fazem sentir nestas condições.

Tem sido igualmente reportada a correlação entre a intensidade da cintilação e a atenuação [2] pelo que os dados também foram processados com este objectivo em mente embora não se apresentem resultados detalhados aqui. As causas apontadas para esta dependência são:

- Mistura de massas de ar com características diferentes;
- Scattering das gotas de chuva;
- Dispersão.

Os dados sobre a correlação entre a intensidade da cintilação e a velocidade do vento são escassos, mas os existentes apontam para um valor baixo. No entanto a velocidade transversal do vento deverá ter uma influência mais directa no espectro da cintilação, sendo usada no cálculo da frequência de canto (ω_c), como já foi referido no ponto 3.1.3 [32].

3.5 Revisão à base de dados existente

Nos modelos que são descritos no capítulo 3.6, é patente a tentativa dos autores relacionarem a intensidade da cintilação com factores meteorológicos.

De todos os factores usados, a temperatura, a humidade relativa e o N_{wet} , são aqueles que mais frequentemente são correlacionados com a intensidade da cintilação. No entanto alguns modelos incluem dados sobre o tipo de nuvens, quantidade de água nas nuvens e o vapor de água.

Na Tabela 3-1 são apresentados alguns locais onde se realizaram campanhas de medida, cujos resultados são usados para a validação de novos modelos.

Local da estação	Coordenadas Lat/Long (°)	$f(\text{GHz})$	ϑ (°)	$D(\text{m})$	η	Satélite
Blacksburg	37.23 -279.60	12.5	14	4		Olympus
		19.77		1.5		
		29.66		1.2		
Crawford Hill	40.39 – 285.81	19.04 28.56	38.6	7	0.73	Comstar
Darmstadt	49.87 -8.63	12.5	27	1.8	0.5	Olympus
		19.77		3.7	0.5	
		29.66		3.7	0.5	

Eindhoven	51.45 – 5.49	12.5 19.77 29.66	26.8	5.5	0.92 0.78 0.44	Olympus
Kirkkonummi	60.22 – 24.40	19.77 29.66	12.7	1.8	0.63 0.38	Olympus
Lesive	50.22 – 5.25	12.5 19.77	27.8	1.8	0.6	Olympus
Louvain	50.76 – 4.62	12.5 29.66	27.6	1.8	0.6	Olympus
Martlesham	52.06 – 1.29	≈11 14.27	≈10	6.1		Intelsat-V (≈60°)
Martlesham	52.06 – 1.29	19.77 29.66	27.5	1.8 6.1		Olympus
Spino d’Adda	45.40 – 9.49	12.5 19.77	30.6	3.5		Olympus
Spino d’Adda	45.40 – 9.49	18.7 39.6 49.5	37.8	3.5		Italsat
Tokyo	35.6 – 139.7	4.17 6.39	5.5	22		Cas A
Upola	20.27 – 204.13	9.55 19.1 22.2 25.4 33.3	2.5	2.7 2.7 2.7 2.7 2.0		Mt. HaleaKala
Yamaguchi	34.18 – 131.55	11.45 14.27	6.5	7.6		Intelsat-V (60°)

Tabela 3-1 – Locais onde foram realizadas campanhas de medidas [28].

Como se pode verificar através da Tabela 3-1, não foram efectuadas campanhas experimentais em Portugal, com vista ao estudo deste fenómeno de propagação. Mesmo a nível da Península Ibérica existem apenas dados em Madrid, recolhidos durante um ano usando a baliza de 50GHz do satélite Italsat [37]. A grande falta de dados experimentais sobre o fenómeno de cintilação nesta região do globo, foram os motivos de maior peso que levaram à realização deste trabalho.

3.6 Modelos de cintilação

São aqui descritos alguns dos modelos existentes para a previsão dos parâmetros do fenómeno de cintilação. Estes modelos são baseados essencialmente na teoria de Tatarski e nas distribuições da amplitude e variância da cintilação[27] obtidas experimentalmente. Tendo em conta que não é fácil obter o valor do perfil de C_n^2 (Eq.3-2), os modelos semi-empíricos aqui apresentados utilizam, como forma de aproximação para este valor, parâmetros meteorológicos: a temperatura, a humidade relativa, a humidade e características de nuvens. Usa-se então o denominado desvio padrão de referência da cintilação, σ_{ref} .

3.6.1 KARASAWA

O modelo de Karasawa é obtido de uma forma empírica tendo em conta os dados de uma campanha experimental realizada em Yamaguchi, Japão (34°12'N, 131°33'E) [38]. Estas medições foram efectuadas a frequências de 11.5 e 14.2GHz, com um ângulo de elevação de 6.5° e usando uma antena com um diâmetro de 7.6m. O modelo apresentado por Karasawa foi ainda testado com dados de outros locais mostrando-se também eficiente para ângulos de elevação entre 4° e 30° e frequências entre 7 e 14GHz. A Eq.3-13 serve de base ao modelo:

$$\sigma_{\chi} = \sigma_{\chi,ref} \eta_f \eta_{\vartheta} \eta_{D_e}, \quad \text{Eq.3-13}$$

onde η_f reflecte a dependência da frequência. Este factor foi obtido a partir da comparação dos dados experimentais para as duas frequências. O resultado obtido, Eq.3-14, teve em linha de conta também a dependência da amplitude de cintilação relativamente ao diâmetro da antena, o qual não é substancialmente diferente do usado no modelo ITU.

$$\eta_f = (f/11.5)^{0.45} \quad \text{Eq.3-14}$$

η_{ϑ} representa a dependência do ângulo de elevação. Para o cálculo deste factor Karasawa obteve duas equações: uma para elevações superiores a 5° e outra para valores inferiores (Eq.3-15). O valor usado para a altura vertical, h , da turbulência é de aproximadamente 2000m.

$$\begin{cases} \eta_{\vartheta} = (\text{cosec} \vartheta) / (\text{cosec} 1.3)^{1.3} & , \quad \vartheta \geq 5^\circ \\ \eta_{\vartheta} = \left(\frac{2 \cdot \sin 6.5^\circ}{\sin \vartheta + \sqrt{\sin^2 \vartheta + (2h/a_e)}} \right)^{1.3} & , \quad \vartheta < 5^\circ \end{cases} \quad \text{Eq.3-15}$$

O valor do factor que relaciona a dependência da cintilação e o diâmetro da antena é dado pela Eq.3-16.

$$\eta_{D_e} = \sqrt{G(D)/G(7.6)} \quad \text{Eq.3-16}$$

Aplicando todos os factores supra descritos à Eq.3-13 e considerando a elevação superior a 5° obtém-se o seguinte resultado:

$$\sigma_{\chi} = 0.0228 \cdot \sigma_{\chi, REF} \cdot f^{0.45} \sqrt{G(D)} / \sin^{1.3} \vartheta \quad \text{Eq.3-17}$$

O valor de $\sigma_{\chi, ref}$ é dependente de alguns parâmetros meteorológicos locais. Karasawa usou os valores das médias mensais da temperatura [C°] e da humidade relativa [%] e calculou a pressão do vapor de água (Eq.3-18).

$$\sigma_{\chi, ref} = 0.15 + 5.2 \times 10^{-3} N_{wet} \quad \text{Eq.3-18}$$

O parâmetro N_{wet} é obtido a partir dos parâmetros meteorológicos referidos acima usando a Eq.3-19 e e_s , que representa o valor de saturação da pressão do vapor de água, é dado pela equação seguinte.

$$N_{wet} = 3730 \frac{H \cdot e_s}{(T + 273)^2} \quad \text{Eq.3-19}$$

$$e_s = 6.11 \cdot \exp(19.7 \cdot T / (T + 273)) \quad \text{Eq.3-20}$$

O modelo permite também calcular as distribuições cumulativas da cintilação, tanto para *enhancements* como para *fades*. Esses resultados são dados por:

$$\chi_{\pm}(P) = \eta_{\pm}(P) \sigma_{\chi}(f, \vartheta, D, T, H) \quad \text{Eq.3-21}$$

Para o caso de *enhancements* o valor de $\eta_{+}(P)$ é obtido a partir de Eq.3-22, para uma gama de $50.0\% \leq P \leq 99.99\%$.

$$\eta_{+}(P) = \frac{-0.0597(\log P')^3 - 0.0835(\log P')^2 - 1.258(\log P') + 2.672}{}, P' = 100 - P \quad \text{Eq.3-22}$$

Para o caso de *fades* o valor de $\eta_{-}(P)$ é obtido a partir de Eq.3-23, para uma gama de $0.01\% \leq P \leq 50.0\%$.

$$\eta_{-}(P) = -0.061(\log P)^3 + 0.072(\log P)^2 - 1.71(\log P) + 3.0 \quad \text{Eq.3-23}$$

3.6.2 ITU P.618-8

O modelo é em tudo semelhante ao sugerido por Karasawa [39], ver secção 3.6.1, no qual aliás foi originalmente baseado. O modelo usa médias mensais da temperatura e humidade relativa obtidas no local onde está instalado o receptor. Os dados experimentais de suporte indicam que o

modelo se aplica a locais com ângulo de elevação superior a 4° e frequências entre 7 e 14GHz. No entanto, também tem sido considerado para frequências mais elevadas (até 20GHz pelo menos) [21].

Os parâmetros usados pelo modelo são:

T : média mensal da temperatura (°C);

H : média mensal da humidade relativa (%);

f : frequência (GHz);

ϑ : ângulo de elevação;

D, η : diâmetro e eficiência da antena utilizada.

O valor do desvio padrão, obtido a partir da Eq.3-24, depende de alguns cálculos auxiliares.

$$\sigma_{\chi} = \sigma_{\chi,ref} * \sqrt{f^{7/6} * g^2(x) / \sin^{2.4}(\vartheta)} \quad \text{Eq.3-24}$$

Os pontos seguintes descrevem os passos necessários para se obter o valor do desvio padrão da cintilação:

a) Calcular o valor de $g^2(x)$: impacto da antena

$$g^2(x) = 3.8637 * (x^2 + 1)^{11/12} \sin\left(\frac{11}{6} * \arctan\left(\frac{1}{x}\right)\right) - 7.0835 * x^{5/6} \quad \text{Eq.3-25}$$

O cálculo do factor relacionado com a antena é efectuado a partir da Eq.3-25. Este valor é dependente do diâmetro da antena, comprimento de onda e da distância entre o receptor e a camada turbulenta.

$$x = 0.0584 * k * D_e^2 / L \quad \text{Eq.3-26}$$

Para se obter o valor do parâmetro x é usada a Eq.3-26, que implica o cálculo do número de onda (k), o diâmetro efectivo da antena usada (D_e) e a distância da estação e a camada turbulenta (L). L é por sua vez obtido da Eq.3-27.

$$L = \frac{2 \cdot h}{\left(\sqrt{\sin^2 \vartheta + 2 \cdot h / a_e} + \sin \vartheta \right)} \quad \text{Eq.3-27}$$

- Diâmetro efectivo da antena - $D_e = \sqrt{\eta} D$, $1.06 > \eta > 1.25$
- A distância do receptor à camada turbulenta é dada pela Eq.3-27, onde h representa altura da camada turbulenta que, no modelo ITU P.618-8, é dada pela aproximação: $h \approx 1000 [m]$. O valor de $a_e \approx 8.5 * 10^6 [m]$, para uma altitude ao nível do mar.

b) Cálculo do desvio padrão referência da cintilação, σ_{ref} .

O valor de referência da cintilação depende de N_{wet} e é obtido a partir da Eq.3-28. O N_{wet} (Eq.3-29) corresponde à contribuição do vapor de água no índice de refração atmosférico. Este parâmetro é função da temperatura e da humidade relativa que devem ser medidos preferencialmente no local da estação receptora. A partir da Eq.3-29 obtém-se o valor de N_{wet} , [40].

$$\sigma_{ref} = 3.6 * 10^{-3} + 10^{-4} * N_{wet} \quad \text{Eq.3-28}$$

$$N_{wet} = \frac{22810 * H * e^{17.5 * T / (T + 240.97)}}{(T + 273)^2} \quad \text{Eq.3-29}$$

As distribuições da amplitude de cintilação do modelo são as mesmas derivadas por Karasawa [39], estando descritas na secção 3.6.1.

3.6.3 OTUNG

Em 1996 Otung apresentou um modelo que permite o cálculo das distribuições anuais e do pior mês para os parâmetros: χ_+ , χ_- , χ_{pkpk} (amplitude pico a pico) e σ_χ .

O modelo foi baseado em resultados obtidos a partir de medições efectuadas com a baliza B₁(19.7GHz) do satélite Olympus entre Setembro de 1992 e Agosto de 1993 em Sparsholt (51.59°N, 1.50°W), Inglaterra. Foi usada uma antena de 12 m e um ângulo de elevação de 28.74°. A taxa de aquisição de dados foi de 10Hz.

O modelo para o desvio padrão da cintilação é bastante semelhante ao modelo ITU-R P.618-8. A diferença reflecte-se na forma com foi derivado o coeficiente referente ao ângulo de elevação. Enquanto no caso do modelo ITU σ_{pre} foi obtido de uma forma empírica, Otung derivou-o baseando-se na teoria de Tatarski obtendo o resultado da Eq.3-30. Este resultado é igualmente dependente da frequência, do parâmetro de suavização da antena dado por Haddon e Vilar e de factores meteorológicos.

$$\sigma_{pre} = \sigma_{\chi,ref} \cdot f^{7/12} \sqrt{g(x)} / \sin^{11/12} \vartheta \quad \text{Eq.3-30}$$

As distribuições cumulativas anuais para percentagem entre $0.01\% \leq P \leq 50\%$ [41] são dadas pelas equações seguintes:

$$\chi_{-a}(P) = 3.6191 \cdot \exp[-9.50142 \times 10^{-4} / P - (0.40454 + 0.00285 \cdot P) \ln(P)] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-31}$$

$$\chi_{+a}(P) = 3.1728 \cdot \exp[-0.0359654 P - (0.272113 - 0.0048 \cdot P) \ln(P)] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-32}$$

$$\chi_{pkpka}(P) = 15.6912 \cdot \exp[2.25734 \times 10^{-5} / P^2 - 0.011558 P - 0.216784 \ln(P)] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-33}$$

$$\sigma_{\chi a}(P) = 2.847 \cdot \exp[0.01827 \cdot P - (0.345529 + 5.00745 \times 10^{-3} P) \ln(P)] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-34}$$

A distribuição do pior mês é obtida seleccionando para uma mesma probabilidade a maior amplitude entre as distribuições mensais[41]. As distribuições são dadas pelas equações seguintes:

$$\chi_{-wm}(P) = 6.8224 \cdot \exp\left[\frac{-10^{-4}(913.12/P + 1.8264^2)}{(0.023027/P + 0.51664) \ln(P)}\right] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-35}$$

$$\chi_{+wm}(P) = 5.5499 \cdot \exp\left[\frac{-10^{-4}(946.864P + 4.4974P^2)}{(0.023573P - 0.261135) \ln(P)}\right] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-36}$$

$$\chi_{pkpkwm}(P) = 21.5895 \cdot \exp\left[\frac{2.21698 \times 10^{-4}}{10^{-4}} \left/ \frac{P^2 - 0.0145353 P - \ln(P)}{0.204576} \right. \right] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-37}$$

$$\sigma_{\chi wm}(P) = 4.9157 \cdot \exp\left[\frac{1.85218 \times 10^{-4}}{P^2} - 0.0435448P - \frac{(0.26467 - 0.0078551P) \ln(P)}{1}\right] \cdot \sigma_{pre} \quad \text{Eq.3-38}$$

Segundo Otung, as equações Eq.3-35, Eq.3-37 e Eq.3-38 são válidas para valores de percentagem entre $0.03\% \leq P \leq 50\%$, no entanto, a Eq.3-36 é válida para P a variar entre $0.01\% \leq P \leq 50\%$.

O modelo proposto por Otung é apresentado como possuindo um bom desempenho para frequências entre 12GHz e 30GHz e ângulos de elevação superiores a 4°.

3.6.4 ORTGIES

O modelo proposto por Ortgies em 1993 baseou-se em 30 meses de dados experimentais recolhidos no âmbito do projecto OPEX-Olympus na Alemanha [39]. Os dados compreendem medições para todas as balizas: 12.5, 19.7 e 30GHz. Este modelo pode ser usado em locais com ângulos de elevação entre 6.5° a 30°. Ortgies propôs duas relações entre a média mensal de $\ln(\sigma^2)$ e as condições meteorológicas:

1. Relação entre a média mensal (m) de $\ln(\sigma^2)$ e o valor de N_{wet} -medido no local do receptor- designado por - *Método Ortgies-N*.

$$m = \langle \ln(\sigma^2) \rangle = \ln \left[g^2(x) \cdot f^{1.21} \cdot (\sin(\vartheta))^{-2.4} \right] + (-13.45 + 0.0462 \langle N_{wet} \rangle) \quad \text{Eq.3-39}$$

2. Relação entre m de $\ln(\sigma^2)$ e a temperatura T designada por - *Método Ortgies-T*.

$$m = \langle \ln(\sigma^2) \rangle = \ln \left[g^2(x) \cdot f^{1.21} \cdot (\sin(\vartheta))^{-2.4} \right] + (-12.5 + 0.0865 \langle T \rangle) \quad \text{Eq.3-40}$$

No primeiro método, Ortgies obteve o valor de m através do valor da refractividade húmida N_{wet} e, no segundo, unicamente com o valor da temperatura.

Este método poderia ser implementado no decorrer deste trabalho, no entanto, por opção e também pela pouca popularidade, não foi incluído nos estudos efectuados até ao momento.

3.6.5 VAN DE KAMP

O modelo de van de Kamp baseou-se na comparação dos dados recolhidos em Kirkkonummi, Finlândia (60.22°N, 24.40°E) com os resultados de campanhas de medições em vários outros locais e com os resultados dos modelos de Karasawa e ITU P.618-8 [42].

A campanha teve uma duração de aproximadamente dois anos (entre Janeiro a Dezembro de 1990 e entre Junho 1992 e Maio de 1993) e foram recolhidos dados de duas balizas do satélite Olympus: B₁ (19.77GHz) e B₂ (29.66GHz). Para tal, foi usada uma antena de 1,8m com uma eficiência de 0.63 a operar com um ângulo de elevação de 12.7° e uma inclinação da polarização de 21° [35].

Após a análise de resultados obtidos em vários locais (e para vários parâmetros de ligação) van de Kamp verificou que não era só o N_{wet} a influenciar a intensidade da cintilação, mas que também a ocorrência de nuvens no caminho do sinal contribuía para o incremento da cintilação.

Tendo em conta estas conclusões van de Kamp introduziu um novo parâmetro na previsão de longa duração de intensidade da cintilação: o conteúdo integrado de água em nuvens carregadas, W_{hc} . Para o efeito, são consideradas nuvens carregadas as nuvens que conduzem a um conteúdo integrado de água superior a 0.70Kg/m².

O parâmetro W_{hc} passou a ser incluído no modelo empírico de previsão de $\sigma_{\chi,ref}$. Na Eq.3-41, Q representa um parâmetro de longa duração, relacionado com a média de W_{hc} , que deverá ser determinado para cada local geográfico [39].

$$\sigma_{\chi,ref} = 0.98 \times 10^{-4} (N_{wet} + Q) \quad \text{Eq.3-41}$$

$$Q = -39.2 + 56 \langle W_{hc} \rangle \quad \text{Eq.3-42}$$

As distribuições do desvio padrão da cintilação, de *fades* e de *enhancements* foram derivadas a partir da comparação dos resultados obtidos com o modelo de Karasawa e com os resultados das medidas efectuadas em vários locais [35]. Posteriormente efectuou uma aproximação das curvas que melhor se adaptavam aos resultados obtendo duas distribuições: $\gamma(P)$ e $\delta(P)$.

$$\gamma(P) = (-0.00515 * \log^3 P + 0.206 * \log^2 P - 1.81 * \log P + 2.81) \sigma_{pre} \quad \text{Eq. 3-43}$$

$$\delta(P) = (0.172 * \log^2 P - 0.454 * \log P + 0.274) \sigma_{pre}^2 \quad \text{Eq. 3-44}$$

A distribuição $\gamma(P)$ dá-nos a distribuição do desvio padrão da cintilação. As distribuições dos *fades* e *enhancements* são dadas por $\gamma(P) + \delta(P)$ e $\gamma(P) - \delta(P)$ respectivamente.

3.6.6 TERVONEN

Tervonen apresentou em 1997 duas novas aproximações para o cálculo de $\sigma_{\chi,ref}$ utilizando dados recolhidos em Kikkonummi, e usados também por van de Kamp. A campanha experimental é a mesma da descrita em 3.6.5.

Os modelos propostos por Tervonen tiveram em linha de conta o facto da utilização apenas de N_{wet} no modelo de previsão de $\sigma_{\chi,ref}$, não ser o ideal e que a presença de nuvens dos tipos cúmulos e cúmulo-nimbos, implicavam um aumento da intensidade da cintilação. Para tal, adicionou o valor da probabilidade de ocorrência de nuvens cúmulos ($P(Cu)$ (%)) e/ou cúmulo-nimbos ($P(Cu \cup Cb)$ (%)) para um determinado local [28].

$$\sigma_{\chi,ref} = 1.34 \times 10^{-4} \overline{N_{wet}} + 7.74 \times 10^{-5} + 9.13 \times 10^{-5} P(Cu) \quad \text{Eq.3-45}$$

$$\sigma_{\chi,ref} = 1.30 \times 10^{-4} \overline{N_{wet}} + 9.92 \times 10^{-5} + 8.38 \times 10^{-5} P(Cu \cup Cb) \quad \text{Eq.3-46}$$

Estes modelos, aquando da sua publicação, não tinham sido testados exhaustivamente no entanto apresentaram uma melhoria dos resultados de previsão de $\sigma_{\chi,ref}$ em pelo menos quatro locais distintos, onde a informação necessária ao teste do modelo estava disponível.

As distribuições propostas por Tervonen são apresentadas nas equações Eq.3-47 e Eq.3-48. A variável $\gamma(P)$ representa as melhorias de sinal (*enhancements*) normalizada (χ_+/σ_χ) e $\delta(P)$ representa a diferença normalizada entre melhorias e atenuações (*fades*) de sinal para a mesma probabilidade.

$$\delta(P) = 1.94\sigma_{\chi}^{3.16} P^{-0.36} \quad \text{Eq.3-47}$$

$$\gamma(P) = -1.694\log(P) + 2.921 + \left[-0.005515\log^3(P) + 0.02973\log^2(P) - 0.004431\log(P) - 0.04449 \right] / \sigma_{\chi} \quad \text{Eq.3-48}$$

As distribuições das melhorias e atenuações de sinal são dadas pelas seguintes equações:

$$\chi_+(P) = \gamma(P)\sigma_{\chi} \quad \text{Eq.3-49}$$

$$\chi_-(P) = [\gamma(P) + \delta(P)]\sigma_{\chi} \quad \text{Eq.3-50}$$

O modelo apresentado por Tervonen não foi implementado no software de processamento devido ao facto de não ter sido possível obter dados fiáveis sobre nuvens. Houve uma tentativa de recolha automatizada de dados referentes a cobertura de nuvens através de um site de meteorologia no entanto, devido às frequentes modificações da estrutura da página, não foi viável recolher informação estatisticamente significativa. Foram também efectuados contactos com o Instituto de Meteorologia e Geofísica com o mesmo objectivo, contudo, estes contactos mostraram-se infrutíferos.

3.6.7 MARZZANO

Os estudos que Marzzano levou a cabo basearam-se no modelo físico da turbulência atmosférica proposto por Tatarskii. Para tal, foram utilizadas campanhas de radiosondagens no norte de Itália. Com os dados recolhidos, Marzzano efectuou várias aproximações através de regressões lineares e quadráticas. Os modelos assentam em estatísticas mensais e horárias sobre factores que influenciam de forma significativa a variância da cintilação. Os resultados foram testados e comparados à posteriori com medidas efectuadas com a baliza B₀ do satélite Olympus [39].

Marzzano propôs três tipos de aproximações para a previsão da variância da cintilação:

- *DSPS – Direct Physical-Statistical Prediction*

$$m = \langle \ln(\sigma^2) \rangle = \ln[g^2 \cdot f^{7/6} \cdot (\sin(\vartheta))^{-2.4}] + \langle m_{ref} \rangle \quad \text{Eq.3-51}$$

Onde $m = \langle \ln(\sigma_{ref}^2) \rangle = -15.84 + 0.1235\langle T \rangle$ e $\langle T \rangle$ é a média mensal da temperatura.

- *MPSP – Modelled Physical-Statistical Prediction*

$$m = \langle \ln(\sigma^2) \rangle = \ln[g^2 \cdot f^{7/6} \cdot (\sin(\vartheta))^{-1.83}] + \ln(211.25\langle H_t \rangle^{-1.83}) + \langle \ln C_n^2 \rangle \quad \text{Eq.3-52}$$

$$\text{Com } \langle H_t \rangle = 2058 + 94.5 \langle T \rangle \text{ e } \langle \ln C_n^2 \rangle = -31.87 + 0.0684 \langle T \rangle$$

Este método relaciona as médias mensais do logaritmo da variância da cintilação e o índice de refração húmido, N_{wet} , ao nível do mar. No terceiro método foram usadas regressões quadráticas para relacionar Temperatura/Humidade, Temperatura/ N_{wet} , Temperatura/Humidade/Vapor de Água Integrado (V_c) e Temperatura/ N_{wet} /Vapor de Água Integrado. Os modelos foram desenvolvidos com base em estatísticas mensais e horárias.

♦ STH2 - Temperatura/Humidade

$$\langle \sigma^2 \rangle = g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-1.83} \exp(a_{01} + a_{11}T + a_{21}RH + a_{31}T^2 + a_{41}RH^2) \text{ , base horária} \quad \text{Eq.3-53}$$

$$\ln \langle \sigma^2 \rangle = \ln(g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-2.4}) + b_{01} + b_{11}T + b_{21}RH + b_{31}T^2 + b_{41}RH^2 \text{ , base mensal} \quad \text{Eq.3-54}$$

♦ STN2 - Temperatura/ N_{wet}

$$\langle \sigma^2 \rangle = g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-1.83} \exp(a_{02} + a_{12}T + a_{22}N_{wet} + a_{32}T^2 + a_{42}N_{wet}^2) \text{ , base horária} \quad \text{Eq.3-55}$$

$$\ln \langle \sigma^2 \rangle = \ln(g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-2.4}) + b_{02} + b_{12}T + b_{22}N_{wet} + b_{32}T^2 + b_{42}N_{wet}^2 \text{ , base mensal} \quad \text{Eq.3-56}$$

Os valores dos coeficientes dos modelos são apresentados na Tabela 3-2.

Coeficientes (eq)	coef_0	coef_1	coef_2	coef_3	coef_4
a (Eq.3-53)	-16.6602	0.1796	0.1192	-0.0018	-0.0007
b (Eq.3-54)	-14.9504	0.1546	0.0747	-0.0011	-0.0005
a (Eq.3-55)	-13.8732	0.0771	0.0875	-0.0014	-0.0005
b (Eq.3-56)	-12.3889	0.13	0.0151	-0.0016	0

Tabela 3-2 – Coeficientes das regressões quadráticas para STH2 e STN2.

♦ STHV2 - Temperatura/Humidade/Vapor de Água Integrado

$$\langle \sigma^2 \rangle = g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-1.83} \exp(a_{01} + a_{11}T + a_{21}RH + a_{31}V_c + a_{41}T^2 + a_{51}RH^2 + a_{61}V_c^2) \text{ , base horária} \quad \text{Eq.3-57}$$

$$\ln\langle\sigma^2\rangle = \ln\left(g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-2.4}\right) + b_{01} + b_{11}T + b_{21}RH + b_{31}V_c + b_{41}T^2 + b_{51}RH^2 + b_{61}V_c^2, \text{ base mensal}$$

Eq.3-58

♦ STNV2 - Temperatura/ N_{wet} /Vapor de Água Integrado

$$\langle\sigma^2\rangle = g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-1.83} \exp\left(\frac{a_{02} + a_{12}T + a_{22}N_{wet} + a_{32}V_c + a_{42}T^2 + a_{52}N_{wet}^2 + a_{62}V_c^2}{1}\right), \text{ base horária}$$

Eq.3-59

$$\ln\langle\sigma^2\rangle = \ln\left(g^2 f^{7/6} (\sin(\vartheta))^{-2.4}\right) + b_{02} + b_{12}T + b_{22}N_{wet} + b_{32}V_c + b_{42}T^2 + b_{52}N_{wet}^2 + b_{62}V_c^2, \text{ base mensal}$$

Eq.3-60

Os valores dos coeficientes dos modelos são apresentados na Tabela 3-3.

Coeficientes (eq)	coef_0	coef_1	coef_2	coef_3	coef_4	coef_5	coef_6
a (Eq.3-57)	-16.8224	0.1413	0.1101	0.1337	-0.0009	-0.0007	-0.004
b (Eq.3-58)	-15.0762	0.1473	0.0772	0.0133	-0.0006	-0.0005	-0.0007
a (Eq.3-59)	-13.9591	0.0633	0.0561	0.1531	-0.001	-0.002	0.0045
b (Eq.3-60)	-12.4255	0.1226	0.0076	0.0427	0.0013	0.0001	0.0014

Tabela 3-3 – Coeficientes das regressões quadráticas para STHV2 e STNV2.

Em todos os modelos apresentados por Marzzano o factor de escalonamento da frequência e o factor suavização da antena são os usados no modelo ITU-R P.618-8.

O modelo proposto por Marzzano poderia ser implementado na aplicação de processamento estatístico de cintilação. Mesmo as aproximações que contemplam o uso valor do vapor de água integrado poderiam ser utilizadas com as nossas medições numa perspectiva de longo prazo. Os dados obtidos a partir do radiómetro foram obtidos há alguns anos contudo uma análise criteriosa permitiria seleccionar os anos meteorologicamente semelhantes.

4 Campanha experimental

Neste quarto capítulo é descrito o sistema que proporcionou a realização deste trabalho, abordando cada uma das partes constituintes. A experiência baseou-se em dados obtidos pela recepção de uma baliza de polarização horizontal na banda Ka (19.701GHz) emitida pelo satélite HotBird-6 colocado a 13° E. O trabalho foi realizado no âmbito de um projecto nacional denominado ESPREX.

O sistema usado pode ser dividido em duas partes - hardware e software – sendo apresentado nos sub-capítulos 4.1 e 4.2 respectivamente. Nestes sub-capítulos serão abordados os blocos mais relevantes que compõem estas duas partes do sistema.

4.1 Hardware

O hardware é dividido em três sistemas independentes: sistema de recepção, equipamento meteorológico e sistema de aquisição de dados. Neste capítulo são descritos os pontos e as características de maior importância.

4.1.1 Sistema de recepção

Um receptor de propagação consiste num equipamento de elevada sensibilidade para a medição da amplitude de um sinal recebido por uma antena. O sinal é normalmente CW, de muito baixa potência, e com uma frequência que varia lentamente no tempo. É exigido algum tipo de seguimento de frequência de forma a ser possível a detecção do sinal numa reduzida largura de banda. O receptor necessita tipicamente de um ganho global superior a 100dB pelo que a sua arquitectura exige várias frequências intermédias com estágios de amplificação e filtragem. Os osciladores locais devem basear-se em osciladores a cristal de elevada qualidade. Um excelente ruído de fase, de forma a não espalhar a potência do sinal no espectro, é uma característica indispensável.

A medição da atenuação atmosférica exige uma estimativa da amplitude do sinal em céu limpo pelo que uma boa estabilidade de ganho do sistema é essencial.

O sistema de recepção implementado é constituído por uma unidade exterior (front-end) e uma unidade interior (back-end), Figura 4-1.

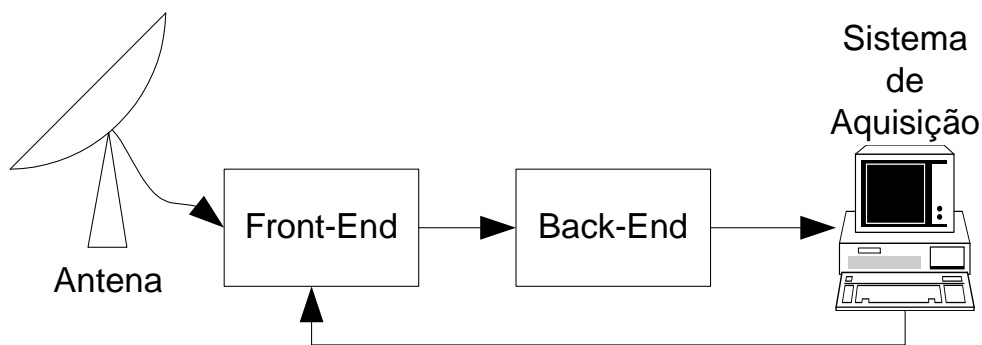


Figura 4-1 – Diagrama de blocos do sistema de recepção

A parte exterior é composta por uma antena de 1.5m equipada com um alimentador e um transdutor de modos ortogonais (OMT) para polarização linear. O isolamento do OMT é de cerca de 30dB e as perdas por retorno nas portas melhor que 15dB.

A unidade exterior possui duas cadeias de conversão, uma para o copolar e outra para o crosspolar, que convertem o sinal para uma FI de 600MHz. Cada cadeia é constituída por um amplificador de baixo ruído (LNA), um duplicador-misturador e um amplificador de FI. A unidade contém ainda um oscilador a cristal estabilizado em forno (OCXO) para um desempenho excelente em estabilidade e ruído de fase. A frequência do OCXO é multiplicada para servir como primeiro oscilador local (OL)- Figura 4-2.

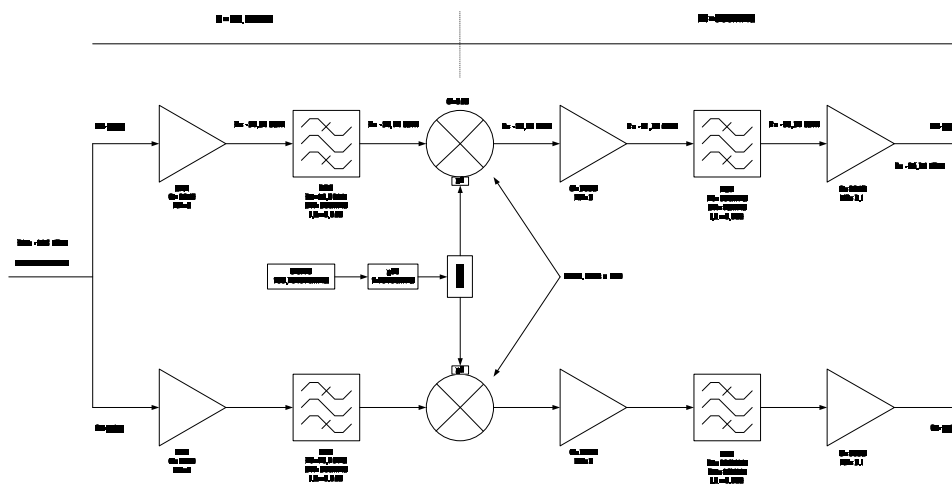


Figura 4-2 – Esquema da unidade exterior do receptor (front-end)

Este bloco criou alguns problemas no decurso da experiência que residiram na dificuldade em estabilizar a temperatura no interior do front-end, provocando uma variação excessiva do ganho. Devido a este motivo, e ainda ao facto da primeira unidade exterior estar vocacionada para a recepção de uma baliza em polarização circular que exigia uma disposição dos componentes e um OMT distinto, optou-se pela construção de uma nova caixa e um melhor sistema de estabilização de temperatura.

O sinal a 600MHz é transportado para a unidade anterior e aí irá passar por dois andares: o primeiro converte o sinal de 600MHz para 10.7MHz e o segundo coloca-o finalmente a uma frequência de 10.7kHz, como se pode observar na Figura 4-3. A conversão do sinal de 600MHz a 10.7MHz envolve um oscilador a cristal controlado por tensão (VCXO) com uma frequência de 147.325MHz. A frequência do VCXO é multiplicada por 4 e a sua frequência controlada por uma DAC da carta de aquisição de dados. A conversão para 10.7kHz usa igualmente um oscilador local 10.673MHz derivado a partir de osciladores a cristal.

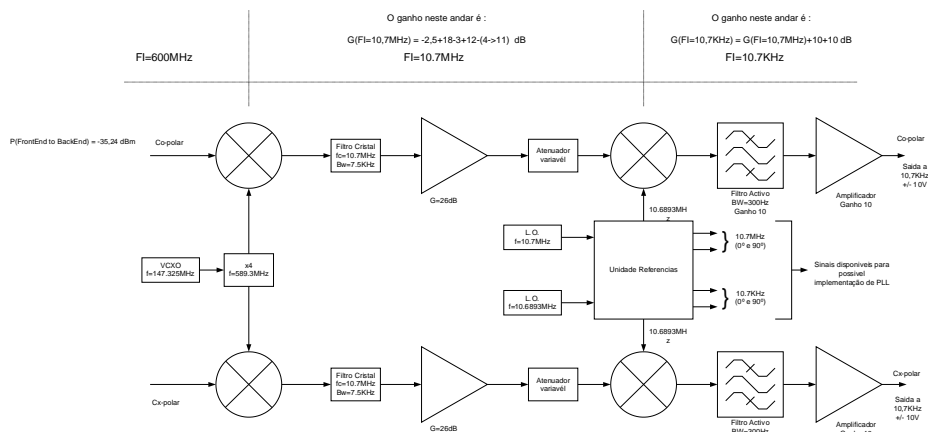


Figura 4-3 – Esquema da unidade interior do receptor (back-end)

As cadeias copolar e crosspolar possuem ganhos semelhantes proporcionando na saída sinais que não ultrapassam +/-10V.

A determinação do ganho e fase diferencial entre as cadeias, relativamente à frente de onda na antena, é necessária para a medição do valor complexo do XPD. Esta operação é feita usando o denominado método McEwan que consiste em injectar um fracção do sinal copolar na cadeia do crosspolar rodando o alimentador cerca de +/-6° em volta da posição nominal. A tarefa é feita periodicamente, sem interromper o funcionamento do receptor, e quando se prevê tempo instável. Os dados são posteriormente tratados para derivar o desvio de fase e o ganho diferencial. Os valores são usados no software de pré-processamento.

O dimensionamento de todos os blocos descritos anteriormente teve como ponto de partida o conhecimento das características do satélite – Tabela 4-1 - e o conseqüente cálculo do respectivo balanço de potências.

HotBird 6	
Posição Orbital	13°E
Frequência da Baliza	19.701GHz
Polarização	Linear Horizontal
EIRP (Aveiro)	16dBW

Tabela 4-1 – Características do satélite utilizado na recepção da baliza.

Coordenadas de Aveiro	40.5°N, 8°W
Diâmetro da antena, d	1.5m
Eficiência da antena, η	0.55

Tabela 4-2 – Valores relativos ao sistema de recepção, utilizados no cálculo do balanço de potências.

Para o cálculo do balanço de potências foram efectuados os seguintes passos e usados os valores das Tabela 4-1 e Tabela 4-2:

- **Elevação, Azimute e Tilt da antena do sistema receptor**

$$Elevação = \arcsin\left(\frac{\cos(Lat_{loc})\cos(Log_{sat} - Log_{loc}) - R}{\sqrt{1 + R^2 - 2R\cos(Lat_{loc})\cos(Log_{sat} - Log_{loc})}}\right) = 38.42^\circ, \quad R = 0.15126$$

$$Azimute = 180 - \arctan\left(\frac{\tan(Log_{sat} - Log_{loc})}{\sin(Lat_{loc})}\right) = 149.41^\circ$$

$$Tilt = \arctan\left(\frac{\sin(Log_{sat} - Log_{loc})}{\tan(Lat_{loc})}\right) = 22.76^\circ$$

- **Ganho (G_r) e Área Efectiva (A_r) da Antena**

$$A_r = \frac{\pi \cdot \eta \cdot D^2}{4} = 0.9719 m^2$$

$$G_r = 10 \cdot \log\left(\frac{A_r \cdot 4 \cdot \pi}{\lambda^2}\right) = 47.21 dB$$

- **Perdas devido ao caminho percorrido pelo sinal**

$$L_{path} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot dist}{\lambda}\right)^2 = 209.45 dB$$

Onde o parâmetro $dist$ é a distância ao satélite $\cong 36000 \cdot 10^3 m$.

- **Figura de Ruído do Amplificador**

$$N_F = 10 \log\left(\frac{T_e + T_0}{T_0}\right) = 2.69 dB$$

Onde os parâmetros $T_e=180^\circ K$ e $T_0=290^\circ K$ representam respectivamente a temperatura do ruído do amplificador e a temperatura de referência. Assumindo a pior temperatura de ruído da antena de $290^\circ K$ temos:

- **Factor de Mérito**

$$G_{Merito} = G_r - 10 \log(T_e + T_0) = 20.48 \text{ dB} / K$$

- **Densidade espectral da relação Portadora/Ruído (CNR)**

$$CNR = EIRP - L_{path} + G_{Merito} - 10 \log(k) = 55.63 \text{ dB} / \text{Hz}$$

Onde $k = 1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ é a constante de Boltzman.

- **Potência recebida no receptor**

$$P_{in} = EIRP[\text{dBm}] - L_{path} + G_r = -116.24 \text{ dBm}$$

A Tabela 4-3 resume algumas das características mais importantes do sistema de recepção e também alguns dos valores obtidos no cálculo do balanço de potências:

Antena e Corneta	
G_r	47.21dB
Azimute	149.41°
Elevação	38.42°
Tilt	22.76°
Front-end	
OXCO	105.734375MHz
Ganho (Cop/Cxp)	78dB/71dB
Back-end	
VCXO	147.325MHz
LO	10.6893MHz
Ganho (Cop/Cxp)	40.5dB
Outros Valores de Interesse	
N_F	2.69 dB
G/T	20.48 dB/K
CNR (céu limpo)	55.63 dB
P_{in}	-118.24 dBm

Tabela 4-3 – Características do sistema de recepção.

A relação CNR medida (53dB/Hz) foi um pouco inferior à estimada provavelmente devido a perdas nos guias de onda flexíveis entre o OMT e os amplificadores LNA e à atenuação atmosférica residual. O EIRP foi estimado em Spino D'Ada, Milão e poderá não ser o aplicável ao nosso local (normalmente é inferior na periferia da Europa).

A estação está ainda equipada com um motor que ventila ar sobre a boca do alimentador, de forma a mantê-lo livre de água da chuva que causa atenuação e despolarização. O motor é ligado automaticamente por um detector de chuva colocado junto à antena.

4.1.2 Estação meteorológica

Os dados meteorológicos são de extrema importância para o sucesso de experiência e, por isso, foi instalado no local de recepção da baliza uma mini estação meteorológica. Esta estação é composta por dois pluviómetros - Figura 4-4 - um de conta gotas (mais sensível e de maior resolução) e outro de balde.

A medição da temperatura e da humidade relativa são efectuadas com uma PT100 e um higrómetro de cabelo respectivamente (como foi referido anteriormente). O último equipamento meteorológico a ser instalado foi um anemómetro- Figura 4-5. Estes últimos equipamentos transmitem o sinal em laço de corrente de 0-20mA dada a considerável distância a que se encontram.

Todos os equipamentos estão interligados ao sistema de aquisição por intermédio de uma carta de protecção, que consiste em cinco canais com isolamento galvânico e óptico, de forma a proteger o sistema de aquisição de possíveis situações anómalas. Esta carta provou a sua utilidade no dia 11 de Fevereiro de 2006 quando uma violenta trovoadas provocou danos em algum equipamento meteorológico. Todos os amplificadores de isolamento e isoladores ópticos ficaram inutilizados mas a dispendiosa placa de aquisição e PC sobreviveram.



Figura 4-4 – Vista dos dois pluviómetros e abrigo do Termómetro e do Higrómetro



Figura 4-5 – Vista do anemómetro e do sistema de recepção

4.1.3 Sistema de aquisição

O sistema de aquisição é composto por duas partes: hardware e software. O hardware é composto por uma carta de aquisição de dados que recolhe os sinais Copolar/CxPolar e os sinais meteorológicos. Esta carta é controlada por um software que também permite a visualização em tempo real dos dados recolhidos. A amostragem dos canais CoPolar e CxPolar é feita com uma frequência de cerca 33KHz. Os sinais copolar e crosspolar são estimados por FFT's com 32768 pontos (para os dados de atenuação) e FFT's com 8192 pontos para os dados de cintilação. No caso dos canais meteorológicos, a amostragem é feita a uma frequência mais baixa, pois a variação dos parâmetros meteorológicos é bastante lenta. Os contadores da carta de aquisição são usados para contar os impulsos dos pluviómetros num determinado intervalo de tempo (1 minuto).

4.1.4 Evolução da campanha experimental

A aquisição de dados iniciou-se em Março de 2004 com o copolar adquirido a 4 amostras/seg. Problemas de estabilidade com a unidade exterior e a necessidade de utilização de um melhor alimentador levaram a uma reestruturação da unidade exterior e à paragem da aquisição em Julho, tendo sido esta retomada em Setembro deste mesmo ano.

O software de aquisição e sincronismo foi melhorado em Setembro de 2004 com vista também à aquisição dos dados meteorológicos. Em Abril de 2005, o sistema estava a funcionar na actual situação. Estão assim disponíveis quase três anos de atenuação, dois anos e seis meses de despolarização, ano e meio de cintilação a 4Hz e um ano de cintilação adquirida a 8 amostras/s.

Nesta tese serão usados exclusivamente dados de cintilação a 8 amostras/s que totalizam no mínimo 12 meses. Os dados referentes a atenuação e despolarização são adquiridos a uma taxa de 1

amostra por segundo. A disponibilidade do sistema é neste momento superior a 97% o que é verdadeiramente excepcional para uma experiência deste tipo. A possibilidade de vigilância e alguma actuação remota contribui para este sucesso.

4.2 Software

Descrevem-se de seguida as aplicações de software que permitiram o tratamento de dados aqui apresentados.

O tratamento de dados é uma tarefa ciclópica, a não ser que se desenvolvam ferramentas que permitam lidar com a enorme quantidade de informação adquirida. A análise dos dados de cintilação envolve não apenas as séries temporais de cintilação, mas também informação respeitante à atenuação do sinal e dados meteorológicos que são alvo de tratamento num software dedicado.

A elaboração de um pacote de software visa não só a realização de tarefas determinísticas, mas também uma razoável oferta de facilidades que permitam ao utilizador classificar os seus dados e eventualmente repará-los em algumas circunstâncias.

Nesta parte do projecto, foram utilizadas as ferramentas de programação Microsoft Visual Studio 6 - C++ e o MatLab. A primeira ferramenta foi usada no desenvolvimento do sistema de aquisição de dados. A plataforma MatLab foi utilizada na criação de aplicações para o tratamento dos dados recolhidos e respectivo processamento estatístico. As aplicações de processamento de dados foram criadas num ambiente de janelas para se tornarem o mais “*user friendly*” possível.

Os próximos sub-capítulos irão servir para apresentar as aplicações desenvolvidas e explicar as aproximações e conceitos usados no seu desenvolvimento.

4.2.1 Aplicação de aquisição de dados

Esta aplicação tem quatro funcionalidades principais: controlar a placa de aquisição de dados, visualizar em tempo real todos os parâmetros, efectuar cálculos com os sinais recebidos (da baliza e meteorológicos) apresentando os valores no monitor e armazenar os dados em ficheiros.

A parte destinada ao controlo da placa de aquisição, permite a configuração de variáveis de iniciação de todo o processo de aquisição de dados e controlo da frequência do VCXO possibilitando, deste modo, o sincronismo do sistema de recepção. Efectua também o controlo e lançamento de processos que levam ao cálculo dos parâmetros desejados (amplitudes copolar e crosspolar, estimativa da CNR e parâmetros meteorológicos) e ao armazenamento dos dados em vários tipos de ficheiros.

A funcionalidade de visualização dos dados recebidos em tempo real, tem uma grande utilidade pois permite monitorizar o sistema constantemente, tanto no próprio local como remotamente.

Os dados são armazenados de cinco em cinco minutos e o ficheiro encerrado a cada 6 horas ou ao fim do dia. Os formatos usados são o binário e, após o encerramento de um ficheiro, são igualmente guardados em formato (*.mat) MatLab. Isto permite um imediato carregamento dos dados e análise flexível de forma a detectar possíveis anomalias.

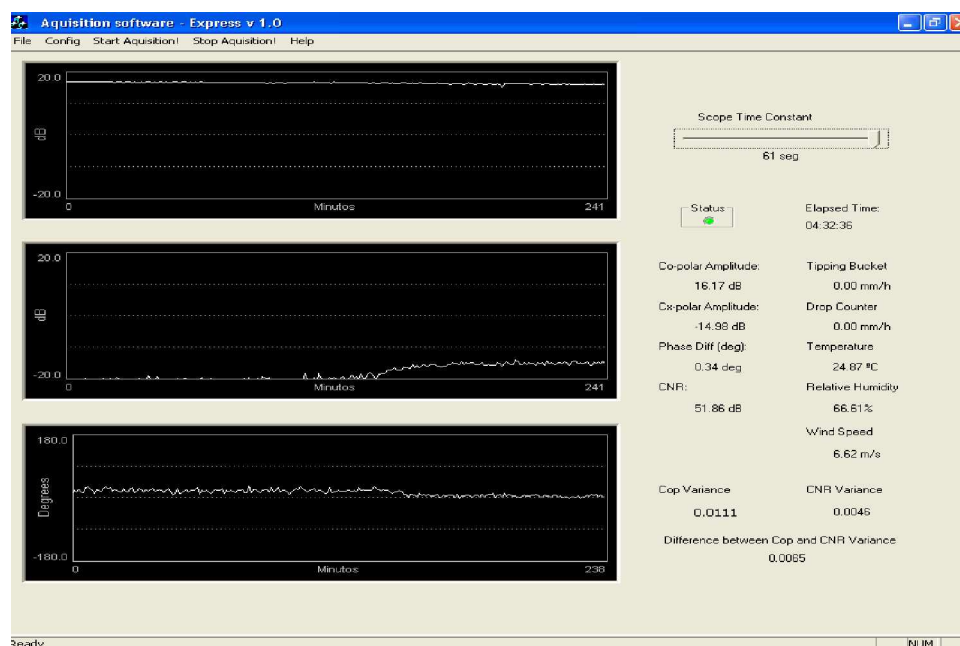


Figura 4-6 – Aspecto da aplicação de aquisição de dados.

4.2.2 Aplicação de processamento de dados (1 amostra/s)

Entende-se por pré-processamento a inspeção, calibração, avaliação da qualidade, classificação e conversão em grandezas físicas dos dados adquiridos. Como interessa caracterizar alguns fenómenos que ocorrem durante menos que 0.001% do ano, a probabilidade de ocorrência de erros que contaminem as estatísticas é muito provável. O exame visual das séries temporais e respectiva validação é obrigatória, portanto uma ferramenta com elevada interactividade é essencial. Descreve-se, de forma breve, a curta intervenção neste pacote de software.

O processamento da atenuação e despolarização é feito por duas aplicações separadas. A primeira, a ser aplicada aos dados em bruto com base em dias completos, é a que possibilita o controlo de qualidade das séries temporais. Após o carregamento dos dados do dia, a aplicação fornece as ferramentas necessárias para reparar as séries temporais que possam ter amostras corrompidas (devido a, por exemplo, um problema de curta duração com o hardware do sistema) ou pura e simplesmente classificá-las como inválidas.

Depois dos dados estarem livres de erros, ou adequadamente classificados, o passo seguinte é o cálculo do nível de sinal copolar (em dB) e as componentes cartesianas do XPD. Segue-se a estimativa do nível do sinal copolar na ausência de atenuação (template), o que permite remover a variação diurna do nível de sinal. Esta estimativa pode ser obtida de uma forma manual (interpolação), automática ou um misto das duas. O método automático dispõe de três mecanismos auxiliares: *wavelets*, médias ou a utilização do template do dia anterior. A aproximação através de *wavelets* mostra-se bastante eficiente. Apesar de ser uma aproximação versátil, existem situações em que é necessária a intervenção do utilizador para melhorar os resultados.

A estimativa dos residuais em céu limpo para o XPD é similar, mas faz-se sobre as componentes cartesianas. Uma vez estimados, os residuais serão subtraídos aos dados medidos obtendo-se assim uma estimativa da grandeza a medir. Em qualquer dos casos, uma boa experiência do utilizador é essencial para os obter, ou seja, localizar adequadamente o início e fim dos eventos. Saliente-se que a atenuação persistente de gases ou provocada por nuvens poderá não ser possível de incluir na estimativa da atenuação. Pode-se porém, a todo o momento, e usando os modelos ITU referidos anteriormente, adicionar uma estimativa da atenuação devido ao vapor de água.

Os dados, agora convertidos em unidades científicas, e a respectiva classificação, são arquivados em ficheiros diários.

4.2.3 Aplicação de processamento estatístico

A segunda parte do tratamento dos dados de atenuação, realizada totalmente no âmbito deste trabalho, diz respeito ao processamento estatístico que pretende a caracterização estática e dinâmica dos sinais de propagação. De natureza “estática” salientam-se: as estatísticas cumulativas, a densidade de probabilidade e estatísticas conjuntas de atenuação (XPD, atenuação Versus XPD, etc). De natureza dinâmica destaca-se: a duração de eventos de atenuação, o tempo de retorno de um evento, o declive de atenuação, etc.

Os dados pré-processados servem como dados de entrada a esta ferramenta e passam por quatro fases distintas:

- a) Carregamentos dos dados respeitantes a um mês;
- b) Cálculo das estatísticas;
- c) Concatenação dos resultados;
- d) Apresentação de resultados estatísticos através de gráficos.

O carregamento dos dados trouxe algumas dificuldades devido ao tamanho das séries temporais da matriz mensal. Para solucionar esse problema optou-se por carregar apenas meio mês

de cada vez. A Tabela 4-4 mostra os parâmetros carregados a partir do ficheiro resultante do pré-processamento.

Nome Físico	Unidades
Atenuação	[dB]
XPD em Fase	[linear]
XPD em Quadratura	[linear]
Temperatura	[°C]
Humidade Relativa	[%]
Humidade Absoluta	[g/m ³]
Velocidade do Vento	[m/s]
Precipitação: Balde	[mm/h]
Precipitação: Conta Gotas	[mm/h]

Tabela 4-4 – Canais carregados pela aplicação.

Após o carregamento dos dados, o software procede ao cálculo das estatísticas desejadas, começando pelas cumulativas e finalizando com as conjuntas. No final deste cálculo irão estar disponíveis as seguintes estruturas de dados que serão posteriormente armazenadas em ficheiros:

MEV	-	Matriz de Eventos
MINTEV	-	Matriz de Intereventos
cumulative_stats	-	Estatísticas Cumulativas
join stats	-	Estatísticas Conjointas

Para além do cálculo das estatísticas cumulativas de todos os dados carregados, foram também calculadas as estatísticas de parâmetros calculados na própria aplicação: *XPD [dB]*, *Fade Slope Up [dB/s]* e *Fade Slope Down [dB/s]*. O *XPD [dB]* é calculado logo a seguir ao carregamento dos dados através da Eq.4-1.

$$XPD(dB) = -10 * \log_{10}(XPD_{fase}^2 + XPD_{quad}^2) \quad \text{Eq.4-1}$$

Os *fades* são calculados quando a aplicação efectua o cálculo das durações dos eventos e intereventos através da Eq.4-2 e Eq.4-3.

$$fade_slope_up = \frac{A(begin) - A(begin - 1)}{\Delta t} \quad \text{Eq.4-2}$$

$$fade_slope_down = \frac{A(end+1) - A(end)}{\Delta t} \quad \text{Eq.4-3}$$

Nas equações anteriores $A(y)$ representa o valor da atenuação num dado instante e Δt indica o intervalo de tempo entre os dois valores de atenuação usados na diferença do numerador.

O cálculo destes parâmetros foi baseado na recomendação ITU-R P.1623 [4] e adaptado à aplicação tal como ilustra a Figura 1-1.

Os resultados das estatísticas cumulativas são organizados numa estrutura de dados e posteriormente armazenados num ficheiro juntamente com os restantes resultados.

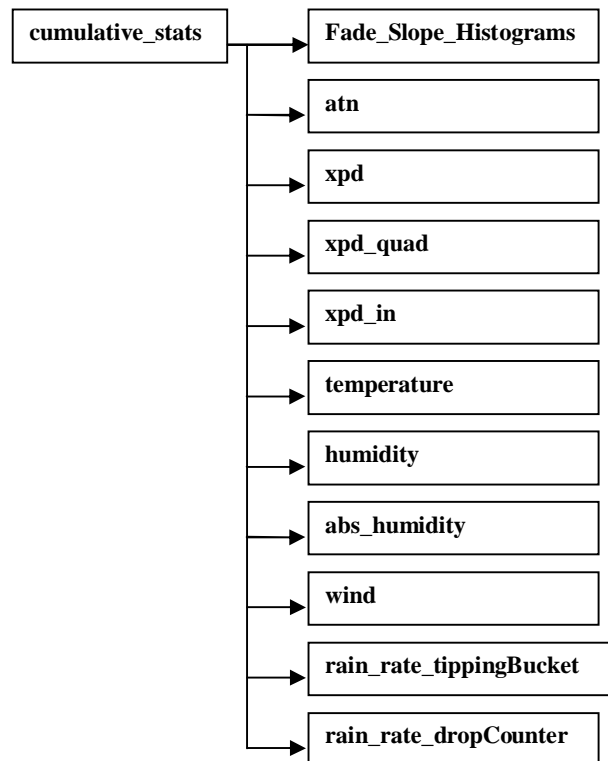


Figura 4-7 – Estrutura de dados das estatísticas cumulativas

As estatísticas conjuntas efectuadas relacionam a atenuação do sinal com os parâmetros apresentados na Tabela 4-5. O cálculo é efectuado a partir de uma função que cria um histograma bidimensional contendo a relação entre a atenuação e o parâmetro desejado.

Atenuação (eixo X) versus
XPd In Phase (eixo Y)
XPd Quadrature (eixo Y)
XPd (eixo Y)
Tipping Bucket Rain Rate (eixo Y)
Drop Counter Rain Rate (eixo Y)

Tabela 4-5 – Parâmetros a correlacionar com a atenuação

Os resultados finais são armazenados num ficheiro com a estrutura apresentada na Figura 4-8.

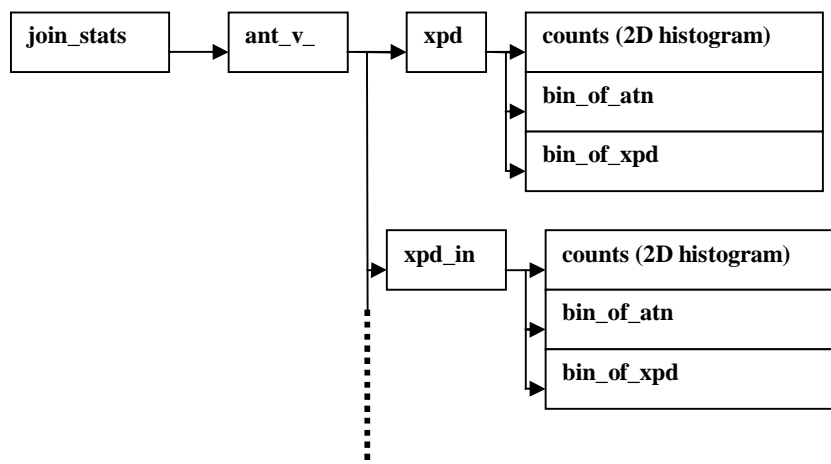


Figura 4-8 – Estrutura de dados das estatísticas conjuntas de atenuação.

Na Figura 4-9 é mostrado um exemplo da estatística conjunta entre a atenuação e o XPD (mais de dois anos de dados). É evidente a presença de gelo como causa principal da despolarização na gama mais baixa de atenuação.

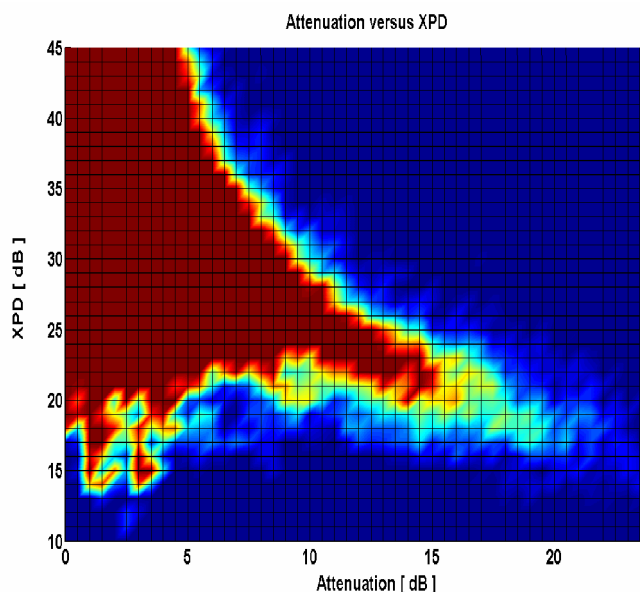


Figura 4-9 – Estatística conjunta entre a Atenuação e o XPD.

A aplicação também efectua o cálculo de estatísticas de duração, pois é a partir destas que é possível caracterizar algumas propriedades relevantes para sistemas de telecomunicações. Estes resultados foram difíceis de obter pois o algoritmo deve ter em linha de conta algumas condições de decisão para se retirarem resultados fiáveis de uma forma automática (independentemente da qualidade dos dados e eventual continuidade do evento de mês para mês).

Foi desenvolvido um algoritmo que se mostra bastante eficaz. O primeiro passo no cálculo da duração dos eventos consiste na identificação e sinalização das amostras que têm dados

inválidos. Após este primeiro passo, é feita a detecção de todas as amostras que estão acima de um determinado patamar de atenuação.

No caso da atenuação, os níveis de decisão usados são os recomendados pelo ITU (1dB, 3dB, 5dB, 10dB, 15dB e 20dB), enquanto que para a precipitação foram adoptados os seguintes: 1mm/h, 5mm/h, 10mm/h, 20mm/h, 30mm/h, 60mm/h e 120mm/h. A análise das séries temporais é finalizada com a utilização do algoritmo criado para a identificação de todos os eventos e que é representado, de uma forma resumida, no fluxograma da Figura 4-10.

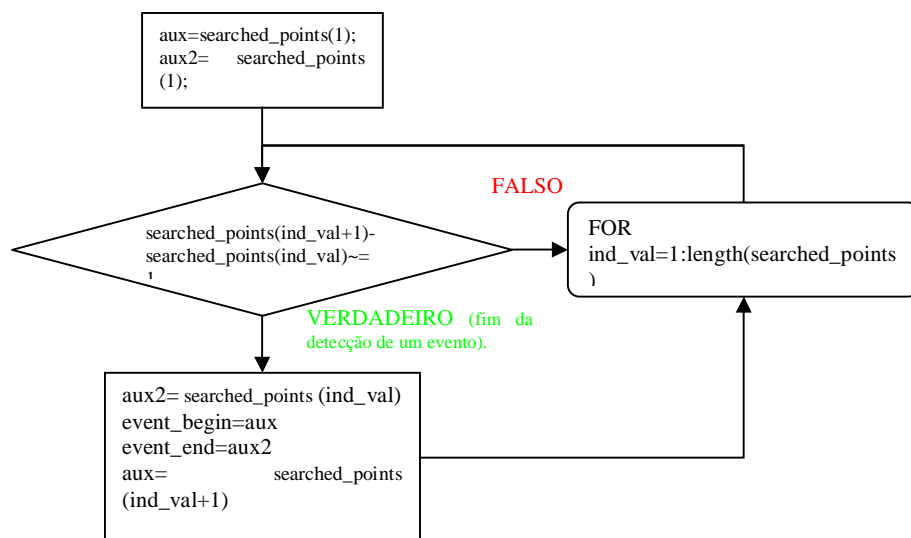


Figura 4-10 – Algoritmo de detecção de eventos.

Para finalizar o processamento das estatísticas de duração de eventos/intereventos, todos os dados obtidos são organizados em estruturas de dados para um fácil acesso aos mesmos em qualquer altura - Figura 4-11 e Figura 4-12.

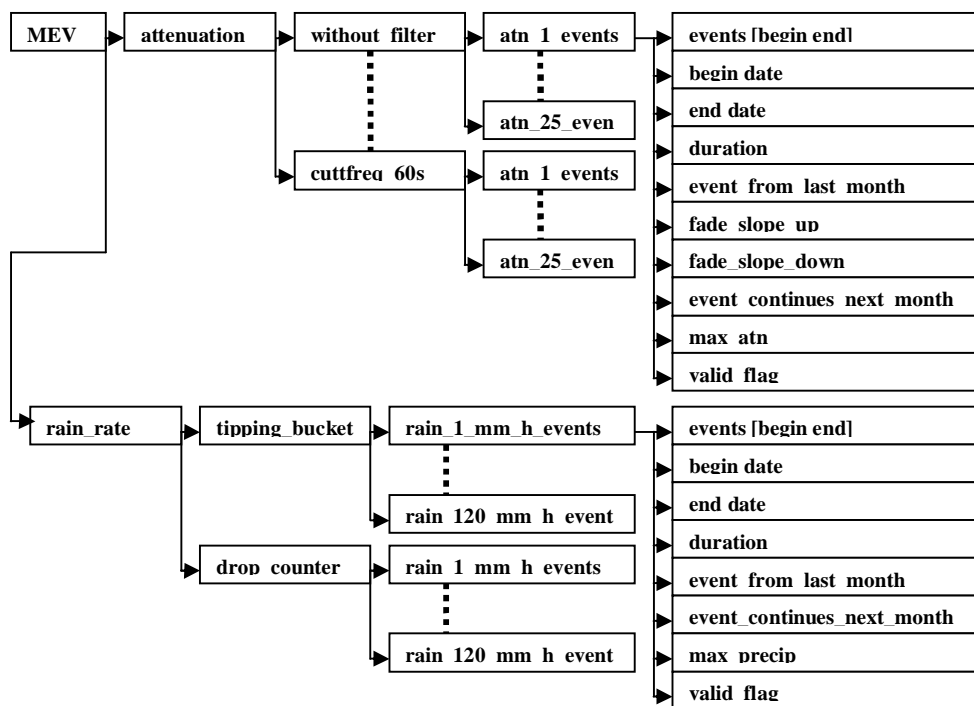


Figura 4-11 – Estrutura de dados para armazenamento dos eventos.

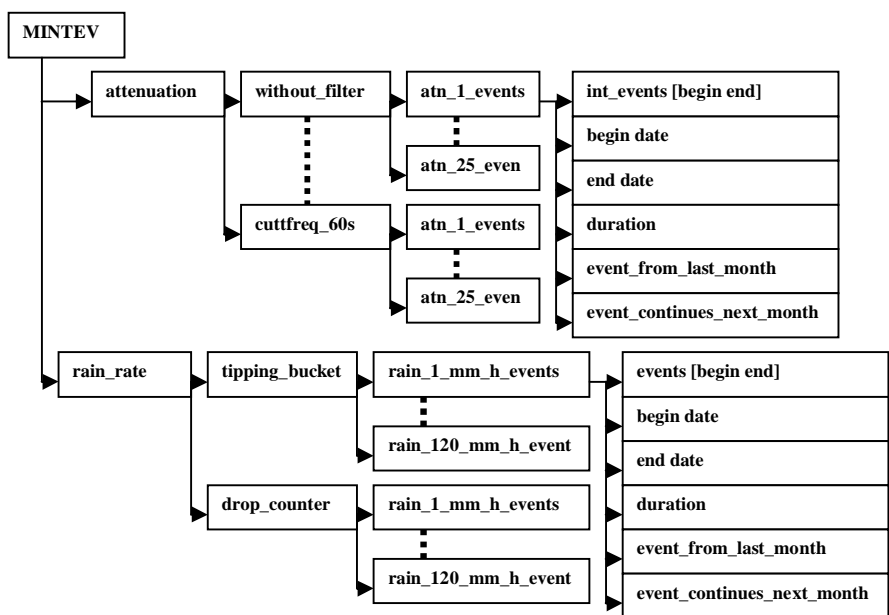


Figura 4-12 – Estrutura de dados para armazenamento dos intereventos.

Esta aplicação foi alvo de um *upgrade* no decorrer da experiência, com o objectivo de determinar o parâmetro *Fade Slope* para tempos de integração dos dados de 4, 10, 20, 30 e 60 segundos além do original com os dados amostrados a 1 amostra/s.

4.2.4 Aplicação de pré-processamento de dados de cintilação

Este sub-capítulo tem como objectivo a apresentação das aplicações de pré-processamento de cintilação e está dividido em duas partes: extracção da cintilação e implementação da aplicação de análise estatística.

O facto de se salientar a extracção da cintilação deve-se ao facto de ser um tema que tem tido diversas abordagens na literatura. Também foi um ponto em que se investiu consideravelmente no desenvolvimento da aplicação, criando ferramentas flexíveis para que o utilizador obtenha os melhores resultados.

4.2.4.1 Extracção de cintilação

A obtenção da amplitude de cintilação, a partir do nível copolar, tem sido um assunto abordado de forma distinta por diversos investigadores. A questão essencial, além da óbvia remoção das variações de ganho ou amplitude diurna do sinal recebido, é a de saber se os fenómenos de cintilação e atenuação (chuva, nuvens, etc) são separáveis com base no seu conteúdo espectral, tendo em conta que os dois fenómenos são de natureza aditiva.

A cintilação é composta por um espectro com frequências mais elevadas do que a atenuação (absorção) pois esta resulta de fenómenos meteorológicos com uma génese mais lenta [43].

Se for considerado que os eventos de chuva têm uma duração média superior a várias dezenas de segundos, então o conteúdo espectral dos fenómenos de atenuação estará limitado a fracções de Hz. Segundo estudos realizados em vários locais, foi concluído que para frequências superiores a 0.04Hz o espectro do sinal já era dominado pelo fenómeno de cintilação. Vários autores usaram filtros passa-alto Butterworth com frequências de passagem a partir de 0.02Hz e 0.04Hz: Tervonen, van de Kamp e Salonen usaram uma frequência de corte 0.02Hz [44]; por seu lado A. Savvaris e E. Otung utilizaram um valor superior de 0.04Hz [45]; enquanto que Matricciani, Mauri e Carlo Riva implementaram um filtro com 0.025Hz [43].

P.D.Baxter e Pablo Garcia [37], por seu turno, efectuaram um estudo onde usaram a técnica de wavelets para extracção do patamar “lento”. Os resultados obtidos revelaram que esta técnica segue de uma forma bastante eficiente as flutuações mais rápidas do sinal eventualmente ainda atribuíveis a absorção.

Após o estudo deste aspecto foi efectuada uma breve análise dos dados de atenuação recolhidos durante o ano 2005 tendo sido processados pela aplicação de processamento de atenuação apresentada no capítulo 4.2.2. A Figura 4-13 apresenta o espectro do nível copolar de um

evento recolhido no dia 10 de Outubro 2005 entre as 13h20 e as 16h38m. O evento regista uma atenuação muito significativa devido a chuva. A partir do espectro verifica-se que para frequências superiores a 0.02Hz, as componentes de atenuação deixam de ter significado, passando a ser mais relevantes as do fenómeno de cintilação.

De qualquer forma, ter-se-á de admitir ser provável haver sempre uma sobreposição espectral dos fenómenos de natureza lenta com a cintilação pelo que, na sua essência, eles são em última análise impossíveis de separar completamente. Catalan e Vilar [46] sugeriram a utilização de um radiómetro com uma antena de diâmetro apropriado e colocação axial à antena da baliza para obter o nível de absorção (patamar lento) do sinal. Um radiómetro é porém um equipamento caro pelo que a solução não é atractiva experimentalmente.

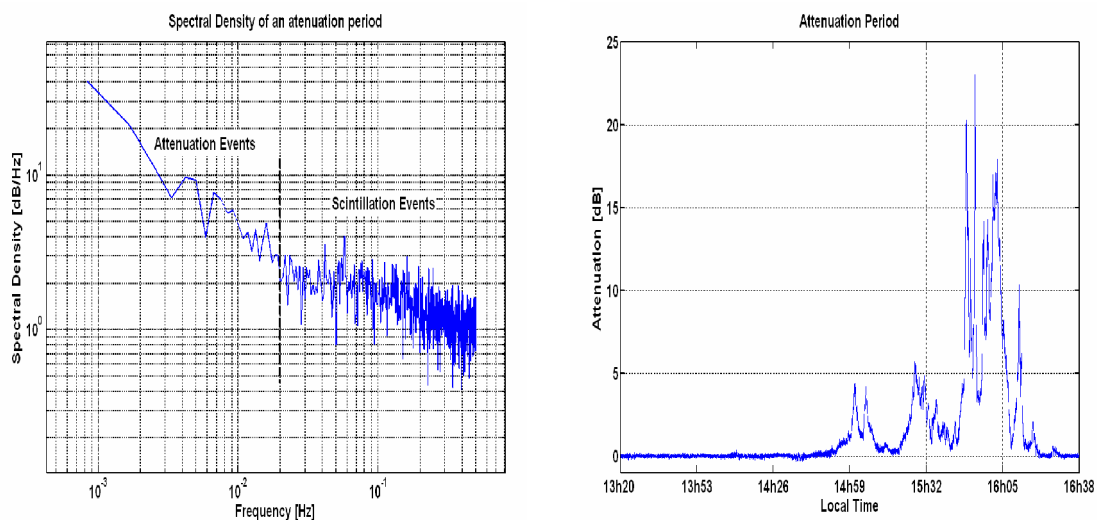


Figura 4-13 – Espectro de evento do dia 10 de Outubro de 2005 e respectiva série temporal.

A aplicação desenvolvida disponibiliza ao utilizador as duas técnicas de extracção de cintilação apresentadas nos parágrafos anteriores: wavelets e filtros. Para além destas duas ferramentas ainda é possível efectuar ajustes manuais.

A aproximação usando wavelets foi implementada a partir de três variantes da família de wavelets *Daubechies*, sendo estas identificadas por nome mais “*user friendly*”: Clear Day, Clouds e Rainy para um melhor acompanhamento da dinâmica do copolar neste tipo de condições. O utilizador pode sempre efectuar pequenos ajustes à resolução da wavelet ou à resolução do filtro da mesma.

O método de filtragem do sinal baseia-se em quatro tipos de filtros: Butterworth, Chebyshev I, Chebyshev II e o Elíptico. A gama de frequências de corte que o utilizador pode usar, varia entre 0.001 Hz e 0.1 Hz. Enquanto a ordem do filtro pode variar entre 1 e 20.

No âmbito deste trabalho para a extracção da cintilação, foi utilizado um filtro Butterworth passa baixo com uma frequência de corte de 0.025Hz e ordem 4. As razões desta escolha foram ditadas por um compromisso entre as várias soluções encontradas na literatura e necessidade de

obter resultados o mais possível comparáveis com outros já publicados. A série temporal obtida a partir da filtragem é subtraída ao sinal de 8Hz do copolar, obtendo-se finalmente a cintilação.

A aplicação mostrou-se bastante eficiente no decurso do processamento dos dados utilizados no âmbito desta tese e foi usada para obter os dados apresentados nos capítulos 5 e 6.

4.2.4.2 Implementação da aplicação

O desenvolvimento desta aplicação representou um investimento significativo pois tem em vista não só o processamento dados para este trabalho, mas também ficar como um ferramenta de referência para possíveis trabalhos posteriores. A aplicação tem como principal objectivo preparar os dados recolhidos, a 8 amostras por segundo, para posteriormente se efectuarem estudos estatísticos de cintilação. Para tal os dados irão passar por algumas etapas:

- Detecção e reparação de amostras corrompidas, Figura 4-14;
- Estimativa do patamar médio do nível copolar para extracção da cintilação (potencialidade descrita no capítulo 4.2.4.1, Figura 4-15);
- Invalidação de dados suspeitos, Figura 4-16;
- Selecção de eventos de cintilação, Figura 4-17, com base em critérios de duração e intensidade de cintilação;
- Validação de eventos, Figura 4-18;
- Armazenamento dos dados processados.

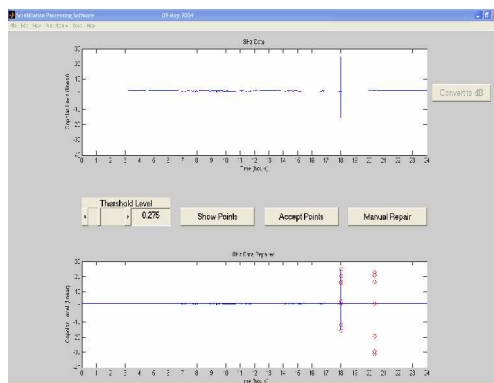


Figura 4-14 – Janela de detecção e reparação de dados.

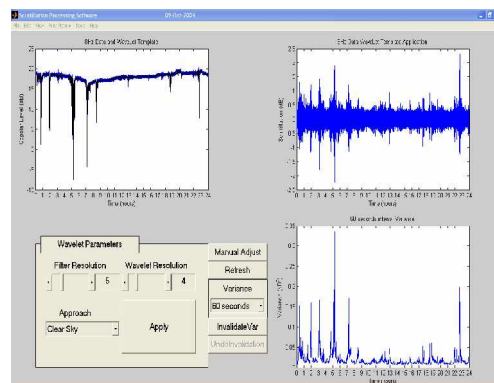


Figura 4-15 – Janela de extracção da cintilação.

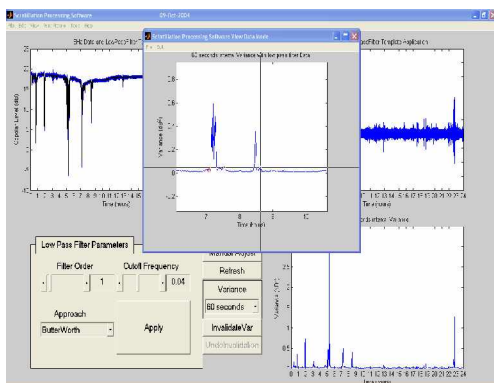


Figura 4-16 – Janela de invalidação de dados suspeitos.

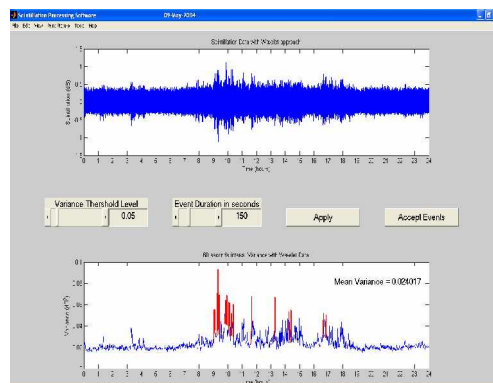


Figura 4-17 – Janela de selecção de eventos.

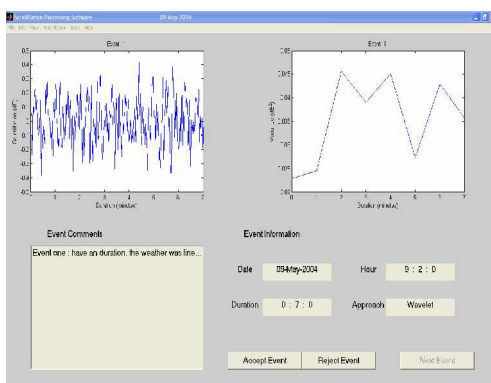


Figura 4-18 – Janela de validação de eventos.

A detecção de amostras suspeitas ou corrompidas é efectuada logo após o carregamento dos dados, sendo o utilizador alertado para a necessidade de reparação da série temporal antes de prosseguir com o processamento. A reparação dessas amostras pode ser efectuada de uma forma automática ou de uma forma manual, passando sempre pela interpolação entre os pontos problemáticos. De qualquer forma fez-se pouco uso desta funcionalidade tendo sido usada apenas para reparar amostras com valores muito díspares das vizinhas.

Obtida a cintilação, poderá ser calculada a sua variância com os seguintes intervalos de tempo: 30, 60 e 120 segundos. A aplicação calcula ainda uma série temporal da variância da cintilação com um intervalo de 60 segundos, segundo o algoritmo mostrado na Figura 4-19.

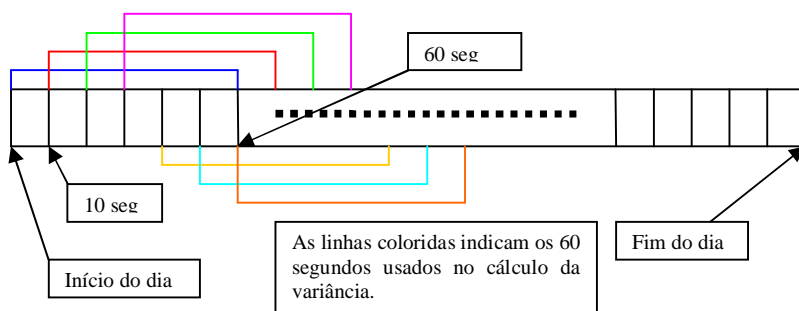


Figura 4-19 – Algoritmo do cálculo da variância com intervalo de 60 segundos.

Após o cálculo da variância, o utilizador pode efectuar uma última verificação dos dados podendo invalidar amostras suspeitas. Tal invalidação é realizada sobre a série temporal da variância já calculada e repercute-se, de forma automática, sobre a secção temporal da amplitude de cintilação correspondente.

Tendo sido finalizada toda a fase de tratamento das séries temporais, a aplicação dispõe de uma facilidade para identificação e recolha de eventos de cintilação específicos. Para tal, é necessário seleccionar um nível de decisão para a variância e outro para a duração do evento. De forma automática, a aplicação assinala todos os períodos nas condições especificadas. O passo seguinte é a selecção um a um dos eventos e proceder ao respectivo arquivamento. Os eventos escolhidos são guardados com toda a informação necessária para posterior análise: data, hora, duração, aproximação usada na criação do nível de referência, comentários e as séries temporais da cintilação e da variância.

Os resultados integrais são ainda armazenados em ficheiros diários para posteriormente serem carregados na aplicação de processamento estatístico referido em 4.2.5.

4.2.5 Aplicação de processamento estatístico da cintilação

A aplicação do processamento estatístico de cintilação é extremamente simples de usar, no entanto, é uma ferramenta muito poderosa e de grande utilidade. A aplicação está dividida em três fases: carregamento de dados previamente processados, cálculos estatísticos (transparentes ao utilizador) e finalmente o armazenamento dos resultados.

Para a obtenção das estatísticas cumulativas, estatísticas conjuntas e das médias horárias e mensais é necessário carregar os parâmetros da Tabela 4-6. Repare-se que algumas das estatísticas são obtidas à custa dos dados processados para uma taxa de aquisição de 1 amostra/s.

Significado Físico	Unidades
Variância 10 em 10s com um intervalo de 60seg (dados 8Hz)	[dB ²]
Variância com intervalo de 60s (dados 8Hz)	[dB ²]
Amplitude da Cintilação (dados 8Hz)	[dB]
Atenuação	[dB]
Temperatura	[°C]
Humidade Relativa	[%]
Humidade Absoluta	[g/m ³]
Velocidade do Vento	[m/s]

Significado Físico	Unidades
Precipitação, através do pluviómetro de conta gotas	[mm/h]

Tabela 4-6 – Dados carregados na aplicação de processamento estatístico de cintilação

Após o carregamento dos dados, o processo de cálculo é transparente ao utilizador. Os resultados estatísticos são armazenados num ficheiro para ser utilizado em futuras análises.

Nesta aplicação são calculadas as estatísticas cumulativas para os seguintes parâmetros: χ^+ , χ^- , χ^{pkpk} , χ versus σ^2 e para σ . Como foi referido anteriormente, esta aplicação efectua cálculos de estatísticas conjuntas que relacionam a variância da cintilação com a temperatura, a velocidade do vento, a cobertura de nuvens, a humidade relativa e a humidade absoluta. Para além destas estatísticas com parâmetros meteorológicos, é realizada também a estatística conjunta entre a variância da cintilação e a atenuação, de forma a poder-se analisar posteriormente a relação entre a intensidade de cintilação e a atenuação.

Outros resultados importantes são as médias horárias e mensais de todos os dados. Estes resultados são muito relevantes, devido ao facto do relacionamento da cintilação com parâmetros meteorológicos só ter algum significado para médias de longa duração. Para complementar os resultados incluiu-se, para efeitos de comparação, o valor do desvio padrão da cintilação calculado a partir da recomendação ITU-R 618-8, Eq.3-24. A partir das equações descritas em 3.6.1 e tendo em conta os seguintes parâmetros obtém-se a equação a usar no nosso caso particular:

- $f = 19.701\text{GHz}$;
- $\vartheta = 38.42^\circ$;
- $\lambda = 0.015\text{m}$;
- $D = 1.5\text{m}$.

Com a utilização das equações referidas anteriormente obtém-se $g^2(x) = 0.9561 \approx 1$ (antena essencialmente pontual nestas condições) e dessa forma o desvio padrão vem,

$$\sigma = 3.6 * 10^{-3} + 10^{-4} * N_{wet} * \sqrt{19.701^{7/6} * 1 / \sin^{2.4}(38.42)}. \quad \text{Eq.4-4}$$

Após o cálculo das estatísticas os resultados são gravados em ficheiros mensais. Os dados são posteriormente usados de forma a obter resultados devidamente organizados para longos períodos.

5 Análise de dados

Nos capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados obtidos durante o decurso deste trabalho.

Os dados que deram origem a estes resultados foram recolhidos, usando uma taxa de aquisição de 8S/s, a partir da baliza de 19.701GHz do satélite HotBird-6 durante um ano, entre Janeiro e Dezembro de 2005. Este ano foi relativamente seco em termos de precipitação. A extracção da cintilação do sinal foi efectuada, como referido anteriormente, através de um filtro Butterworth passa baixo de ordem 4 e uma frequência de corte 0.025Hz. O cálculo da variância foi sempre efectuado considerando-se um intervalo de 60 segundos.

Para este estudo, foram considerados todos os dados independentemente das condições climáticas, ou seja, estão incluídos os dados recolhidos também durante períodos de atenuação. Recorde-se que eles poderão ser retirados, pois a informação sobre a atenuação pode ser recuperada com facilidade.

No capítulo 5 é analisado o comportamento dos parâmetros meteorológicos medidos no local. Através desta análise é possível verificar quais os parâmetros que apresentam uma maior correlação com a intensidade da cintilação. O parâmetro N_{wet} é também analisado de uma forma semelhante aos parâmetros meteorológicos. Para o valor do parâmetro Q , necessário ao modelo de van de Kamp, foi usado $W_{hc} = 1.18\text{kg/m}^2$.

O valor W_{hc} foi estimado a partir de medidas radiométricas efectuadas durante três anos (1994-1996) com um radiómetro de 21.3, 23.8 e 31.7GHz. O radiómetro é um equipamento que mede a temperatura de ruído do “céu” (T_{sky}) observada por uma antena. Esta temperatura deve-se à emissão atmosférica de gases, nuvens e precipitação.

O radiómetro operou com um ângulo de elevação de 40° no local onde foram recolhidos os dados experimentais deste trabalho.

Usando uma simplificação da equação de transferência radiativa é possível, a partir de T_{sky} , obter uma estimativa da atenuação atmosférica com razoável precisão até cerca de 7dB [47]. Para valores superiores a contribuição dos mecanismos de *scattering*, a imprecisão da denominada temperatura equivalente do meio e erros na própria medição de T_{sky} , tornam a estimativa da atenuação muito imprecisa.

A medição simultânea de T_{sky} a duas frequências adequadamente escolhidas permite separar as contribuições para a atenuação dos gases e da água líquida (nuvens e chuva). Usando um modelo linear que relaciona a atenuação com o conteúdo integrado de água líquida (ILW) e vapor de água na atmosfera (IWV) é possível efectuar uma estimativa de ambos os valores pela resolução de um sistema de duas equações [48].

5.1 Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros meteorológicos que influenciam a intensidade de cintilação. O ano de 2005 foi, embora seco, um ano de temperaturas moderadas: Agosto foi o mês mais quente, com se pode verificar na Figura 5-1.

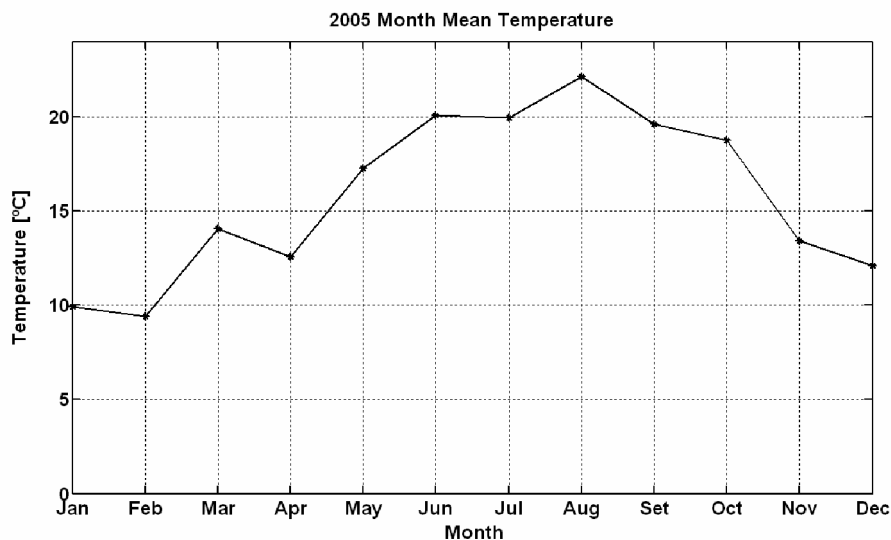


Figura 5-1 – Média mensal da temperatura do ano de 2005.

Este parâmetro tem uma variação diária lenta com um mínimo entre as 6 e as 8h e o máximo cerca das 14-15h. A sua dinâmica é semelhante em todas as estações do ano apesar de, em cada uma delas, o valor médio ser naturalmente diferente. A Figura 5-2 mostra a dinâmica horária da temperatura sazonal e anual.

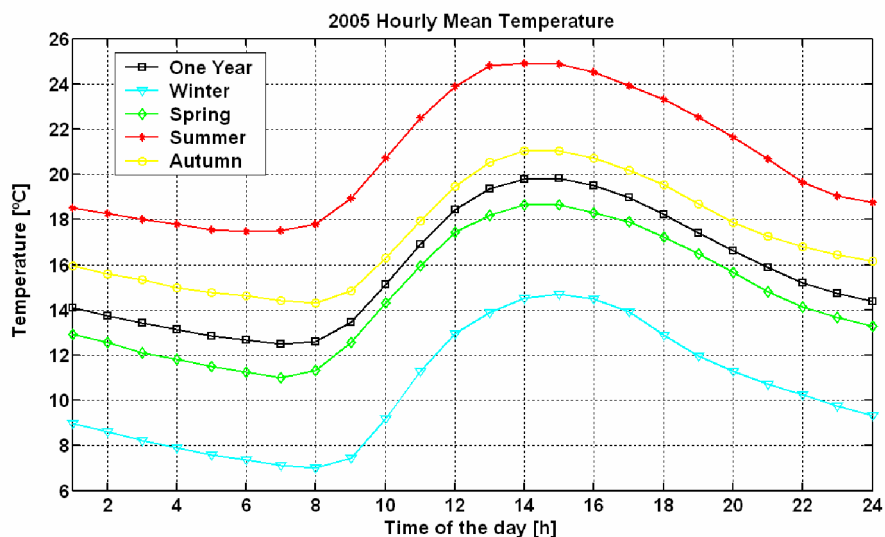


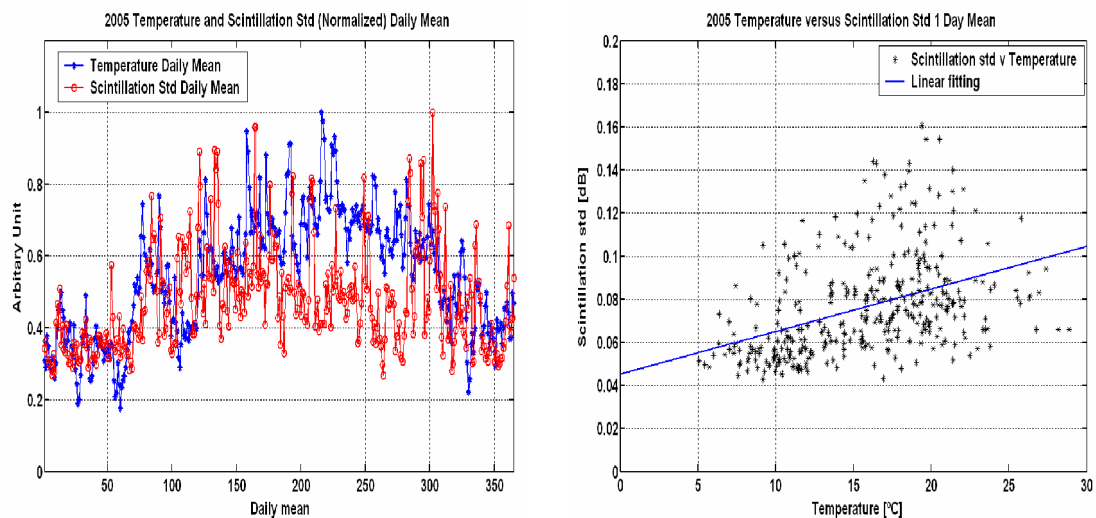
Figura 5-2 – Média horária da temperatura anual e por estação do ano.

No decorrer da descrição e caracterização do fenómeno de cintilação e respectivo modelamento, foi referido que a correlação da intensidade de cintilação com parâmetros

meteorológicos é mais evidente com médias de longos períodos (mensais pelo menos). Para além disso também os modelos de previsão são baseados em médias mensais dos parâmetros meteorológicos. Dos resultados dos gráficos de *scatter plot*, Figura 5-3, verifica-se que a correlação entre a cintilação e a temperatura vai melhorando com o aumento do intervalo usado no cálculo da média.

A partir da análise dos gráficos da temperatura e do desvio padrão da cintilação, observa-se que o fenómeno de propagação acompanha razoavelmente o parâmetro meteorológico. No entanto, verifica-se que nos meses de Verão este facto não acontece, tendo mesmo um comportamento quase inverso, excepção feita para médias anuais de cada uma das horas do dia, como se poderá constatar mais à frente.

O motivo pelo qual nos meses de Verão de 2005 a intensidade da cintilação e a temperatura não seguem uma dinâmica similar, pode estar ligado ao facto do ano ter sido muito quente e seco levando a que os factores meteorológicos medidos ao nível do receptor não tivessem muita influência no fenómeno de propagação. Para além das condições atmosféricas ao nível do receptor, um outro factor que poderá ter contribuído para a fraca intensidade de cintilação neste período do ano terá sido uma grande estabilidade atmosférica a altitudes mais elevadas. No entanto não foi possível obter dados para esses níveis por forma a sustentar esta possibilidade.



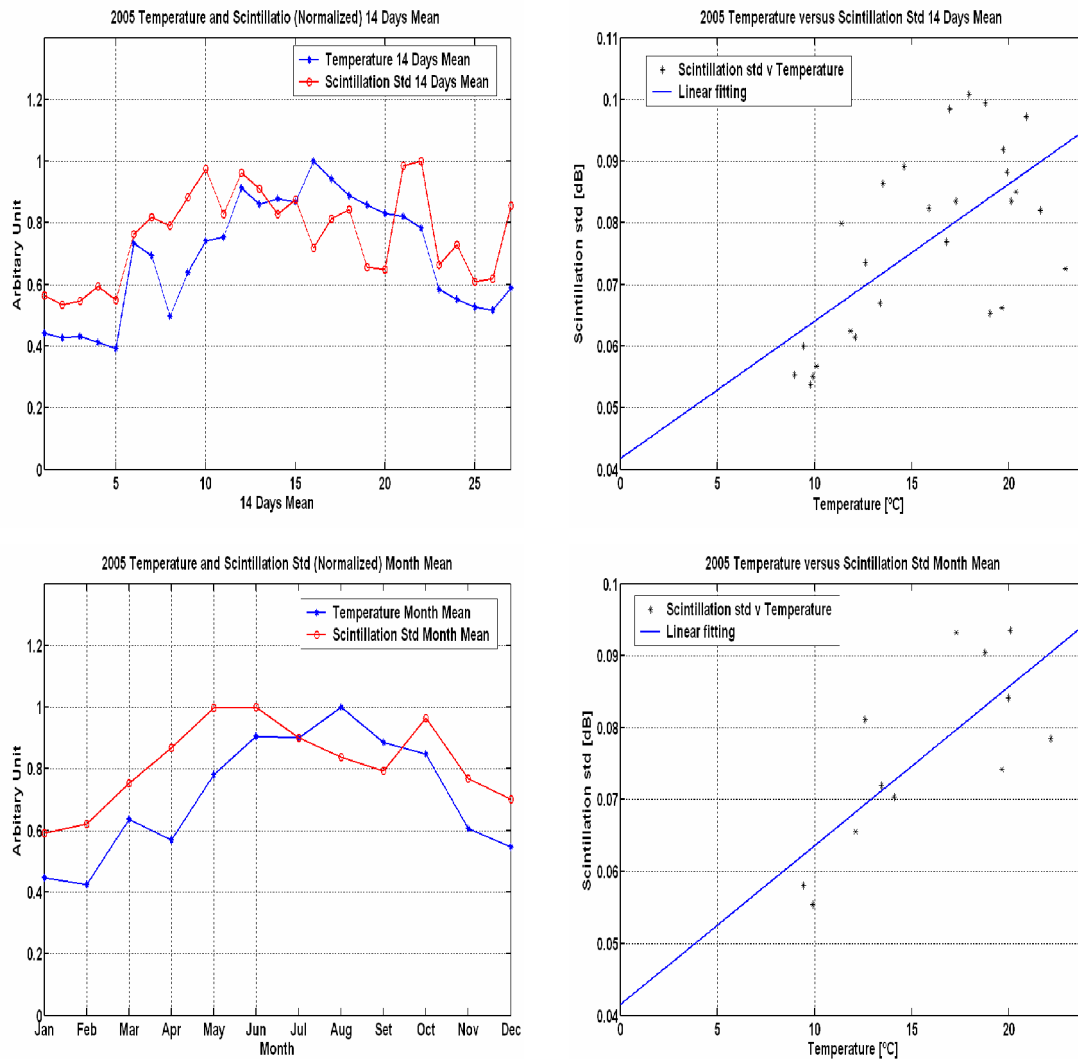


Figura 5-3 – Variância e $Scatter$ plot da σ_x versus Temperatura para vários intervalos de tempo.

Para além das médias usadas anteriormente, foi também efectuada uma análise ao comportamento do desvio padrão da cintilação e da temperatura para a média horária estendida a todos os dias do ano (ou seja 365 períodos de 1 hora). Esta aproximação permite verificar, a partir da Figura 5-4, que a intensidade da cintilação acompanha a variação diária da temperatura, principalmente na parte do dia em que esta é mais elevada, entre as 12 ~ 19 horas.

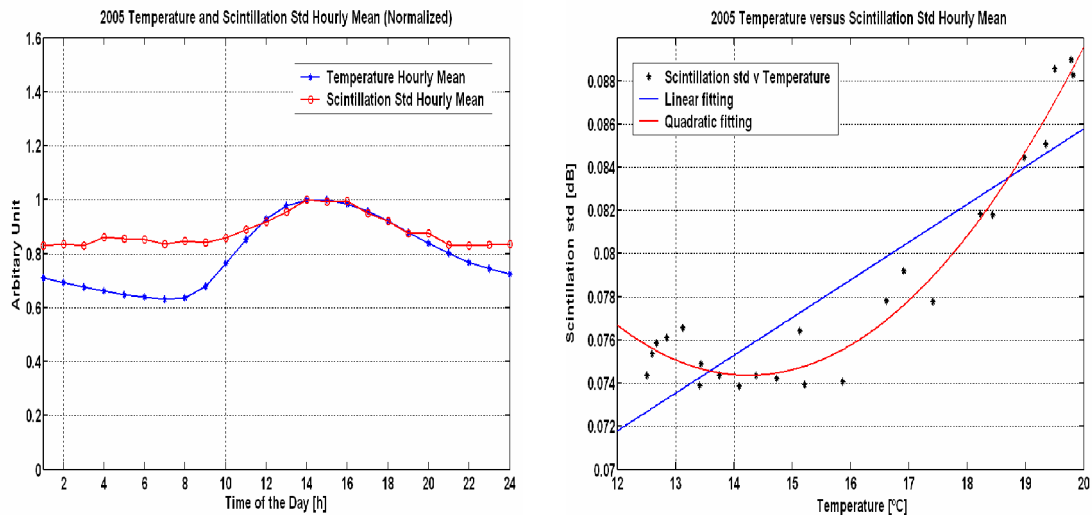


Figura 5-4 - Variação e Scatter plot da σ_χ versus Temperatura para uma média horária anual

Tendo em conta o comportamento destes dois parâmetros, para este tipo de aproximação, seria de esperar, como se pode verificar na Figura 5-4 através do *scatter plot*, que estes estivessem significativamente correlacionados. Ainda no mesmo gráfico foram incluídas duas curvas de aproximação, uma linear e outra quadrática. Como se pode visualizar na Figura 5-4 a que mais se ajusta aos resultados obtidos é a quadrática que é descrita pela seguinte função:

$$\sigma_\chi = 0.00046 * T^2 - 0.013 * T + 0.17.$$

Existe uma aglomeração de pontos junto a um desvio padrão de 0.075dB para as temperaturas mais baixas. Este facto poderá ser explicado por uma extracção menos eficiente do residual do desvio padrão devido à CNR do receptor. Este residual foi subtraído dos dados na forma de uma constante, contudo a CNR tem uma variação diurna de cerca de 2dB. Uma melhor solução teria sido efectuar a remoção usando a estimativa horária disponível da CNR que, em si, é calculada pelo software de aquisição.

Os coeficientes de correlação entre a intensidade da cintilação e a temperatura, para cada dos intervalos considerados pelo software de processamento, são apresentados na Figura 5-5. O cálculo dos valores foi efectuado recorrendo à função *corrcoef* do MatLab.

Nesta figura pode-se facilmente verificar que com o aumento do intervalo usado no cálculo das médias a correlação entre os dois factores vai aumentando. Pode no entanto surgir a questão – “Se a correlação aumenta com o intervalo das médias, porque é que a média horária tem melhor correlação do que as restantes?”. Esta pergunta faz algum sentido, no entanto deve-se ter em conta que o resultado se deve a uma média anual de cada hora do dia, com já foi referido, ou seja o que realmente se tem neste caso é uma média de base anual e não horária. A nomenclatura usada serve principalmente para focar o facto de se tratar de uma análise diária dos parâmetros em questão. Temos essencialmente 365 horas num ano versus cerca de 730 horas consecutivas de um mês.

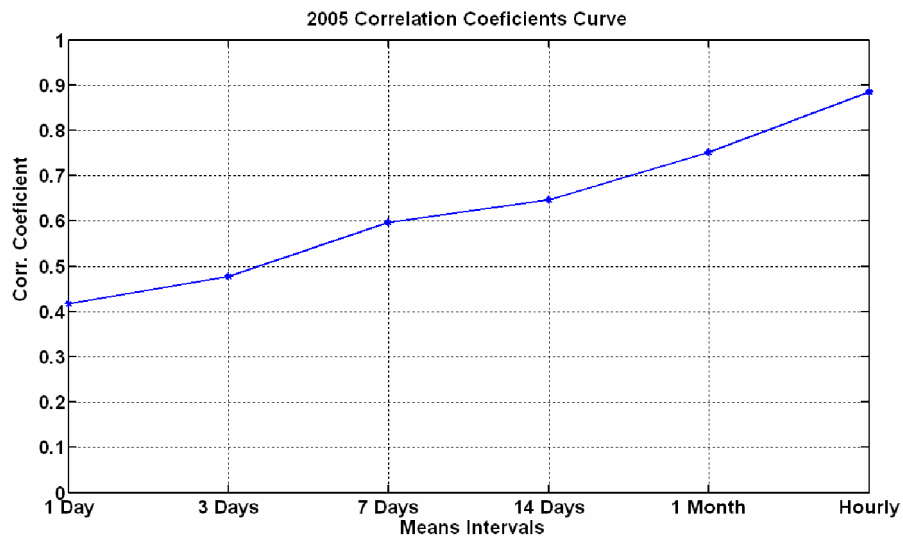


Figura 5-5 - Coeficientes de correlação entre a σ_χ e a Temperatura, para várias médias efectuadas.

As estatísticas conjuntas apresentadas na Figura 5-6 mostram que o período em que foi realizada a campanha de medidas não foi muito rico em eventos de grande intensidade de cintilação. Verifica-se que a maior parte dos valores de intensidade da cintilação se situam à volta de um valor residual de 0.005 dB^2 . Pode-se ainda concluir, apesar de haver poucos eventos, que existe uma tendência para a ocorrência de eventos de maior intensidade de cintilação para temperaturas mais elevadas.

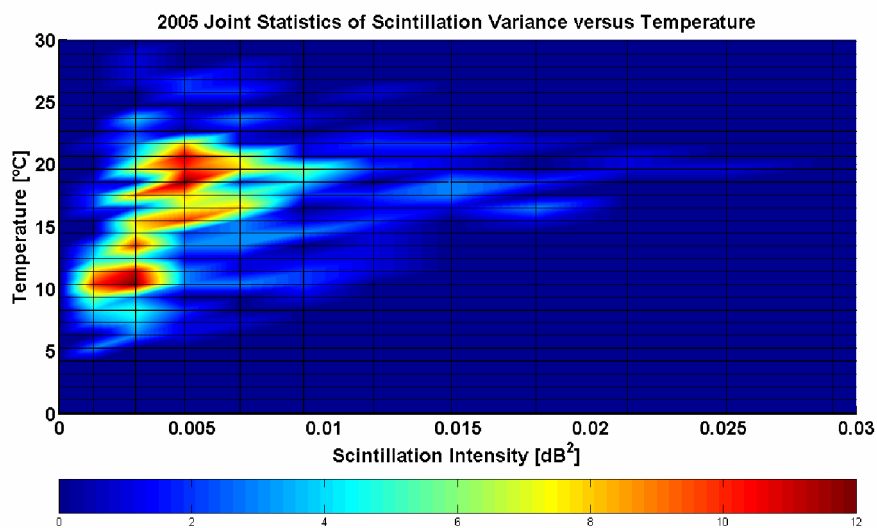


Figura 5-6 – Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e Temperatura.

A partir dos resultados apresentados, podemos concluir que a temperatura é um parâmetro meteorológico que influência de forma significativa a intensidade da cintilação: uma temperatura mais elevada corresponde a um aumento da intensidade de cintilação. De facto a temperatura elevada deverá conduzir a situações de maior instabilidade atmosférica. No entanto, na

aproximação que usa média mensal verifica-se que nos meses com temperatura mais elevada a intensidade de cintilação diminui. Este facto indica que apesar deste parâmetro se correlacionar de uma forma satisfatória com a intensidade da cintilação, é necessário utilizar outros parâmetros meteorológicos para melhorar a aproximação.

Após a análise, verificou-se que a aproximação que proporciona uma melhor correlação é a média anual de todas as horas do dia. O. Paul Banjo e Enric Vilar [49], verificaram também que a existe uma boa correlação entre a variação diária da intensidade da cintilação e da temperatura.

5.2 Humidade relativa

A média mensal da humidade relativa durante o ano de 2005 teve uma excursão pequena. Na Figura 5-7 é ilustrada a média mensal podendo-se observar que este parâmetro variou unicamente entre 65 ~ 80 %. Esta pequena excursão de valores vem de encontro ao facto do ano de 2005 ter sido um ano de condições meteorológicas não contrastantes e, por outro lado, o local ser de forma geral húmido devido à localização geográfica.

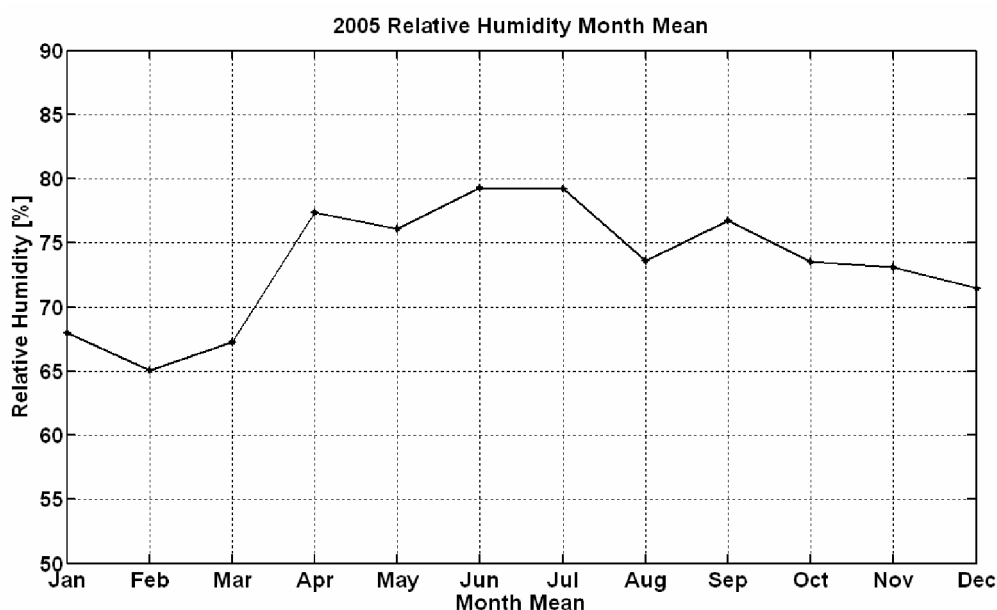


Figura 5-7 - Média mensal da Humidade Relativa.

A variação diária da humidade relativa é, tal como a temperatura, lenta sendo mais elevada durante a manhã e noite, atingindo por vezes os 90 % (o higrómetro está especificado para medir a humidade relativa entre 10 e 90%). Verifica-se através da Figura 5-8, que a dinâmica do parâmetro meteorológico se mantém durante todo o ano, mesmo com mudança de estação. Neste caso a única variação são os valores extremos da humidade relativa.

Mantendo-se a atmosfera constante, a humidade relativa aumenta com a diminuição da temperatura como seria esperado. Situações de humidade relativa abaixo de 30% são bastante raras

e acontecem em períodos de vento Norte estival, frequente no local, e após passagem de determinadas frentes. Atendendo à dependência da humidade absoluta com a temperatura, à variação diária da temperatura e ao modelo ITU respectivo, facilmente se constata que a atenuação devido ao vapor de água deverá ser mais significativo durante os períodos mais quentes do ano.

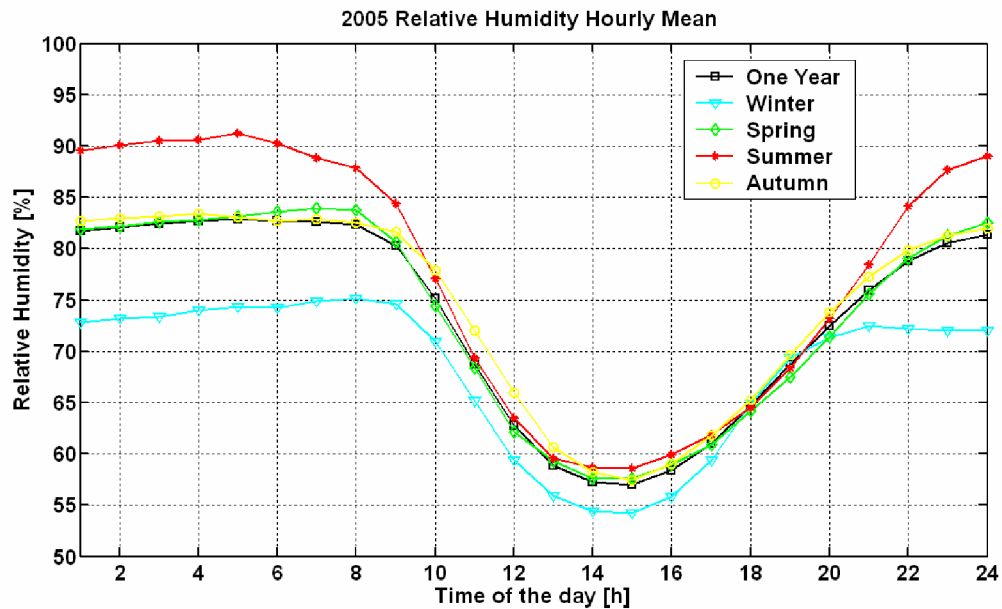


Figura 5-8 - Média horária da Humidade Relativa anual e por estação

Na Figura 5-9 podem-se observar vários gráficos relacionando a intensidade de cintilação e a humidade relativa. Verifica-se facilmente que quanto maior for o intervalo utilizado para o cálculo da média, maior é a similaridade entre os dois parâmetros.

Com base nos gráficos *scatter plot* (à direita) pode-se concluir que com o aumento do intervalo melhora a correlação entre os dois parâmetros, sendo o melhor caso obtido para a média mensal. Para as restantes aproximações verifica-se um espalhamento bastante grande dos pontos nos gráficos de *scatter plot* reflectindo dessa forma uma menor correlação entre os parâmetros.

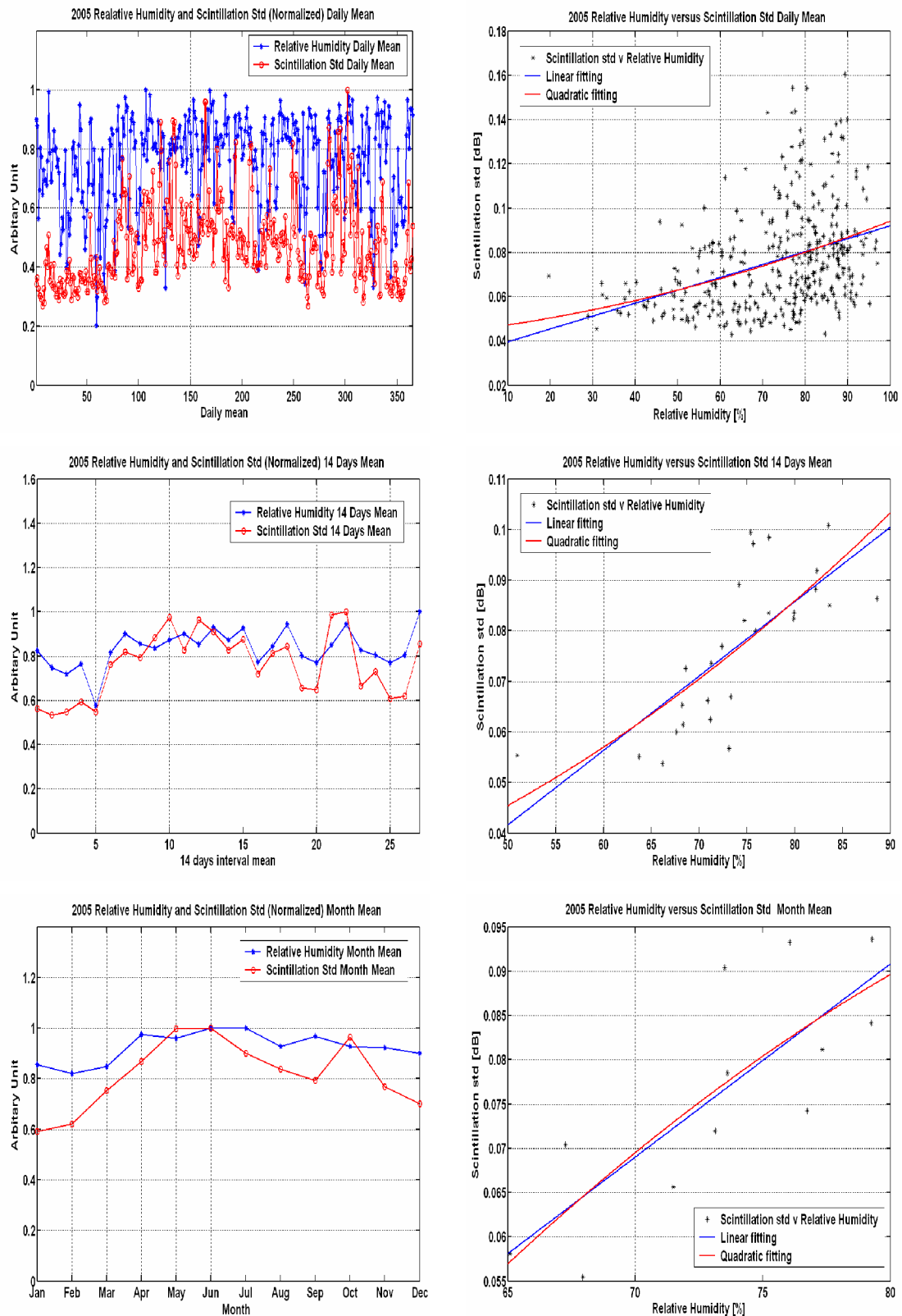


Figura 5-9 - Variação e Scatter plot da σ_χ versus Humidade Relativa para vários intervalos de tempo.

Também para este parâmetro meteorológico (humidade relativa) foi efectuado o estudo do seu comportamento diário usando a média anual de cada hora do dia. A comparação com a intensidade da cintilação revela um comportamento inverso principalmente entre as 8 ~ 21 horas, como se pode observar na Figura 5-10. O resultado mostra que o coeficiente de correlação entre estas duas grandezas tem no entanto um valor absoluto elevado.

No mesmo gráfico de *scatter plot*, foram inseridos dois tipos de *regressão*: linear e quadrática. A curva que melhor se ajusta aos dados, como seria de esperar, é a quadrática sendo descrita pela equação $\sigma_{\chi} = 2.5e^{-5} * H^2 - 0.004 * H + 0.24$. É ainda observável a aglomeração de pontos para humidade relativa elevada (maioria dos casos períodos nocturnos) devido às razões já mencionadas e que pode condicionar os resultados das regressões.

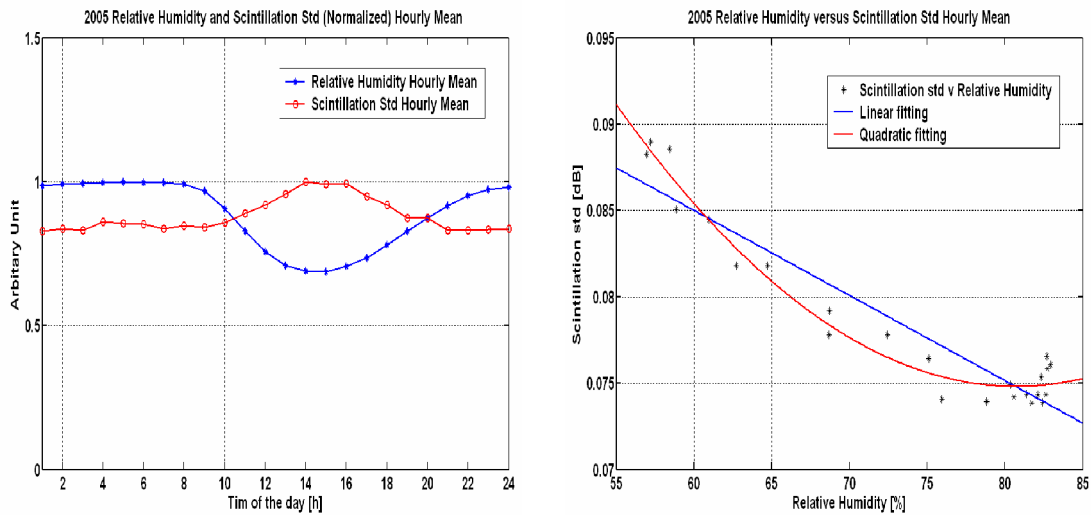


Figura 5-10 - Variação e *Scatter plot* da σ_{χ} versus Humidade Relativa para uma média horária anual.

A Figura 5-11 ilustra os valores dos coeficientes de correlação. Como se pode verificar, a correlação vai aumentando com o intervalo usado para o cálculo da média, com a excepção da média anual de todas as horas do dia que assume valores negativos. Este resultado deve-se ao facto de, para este tipo de aproximação, os dois parâmetros terem comportamento inverso devido à relação entre humidade absoluta e temperatura e uma evidente dependência da intensidade de cintilação com a hora do dia.

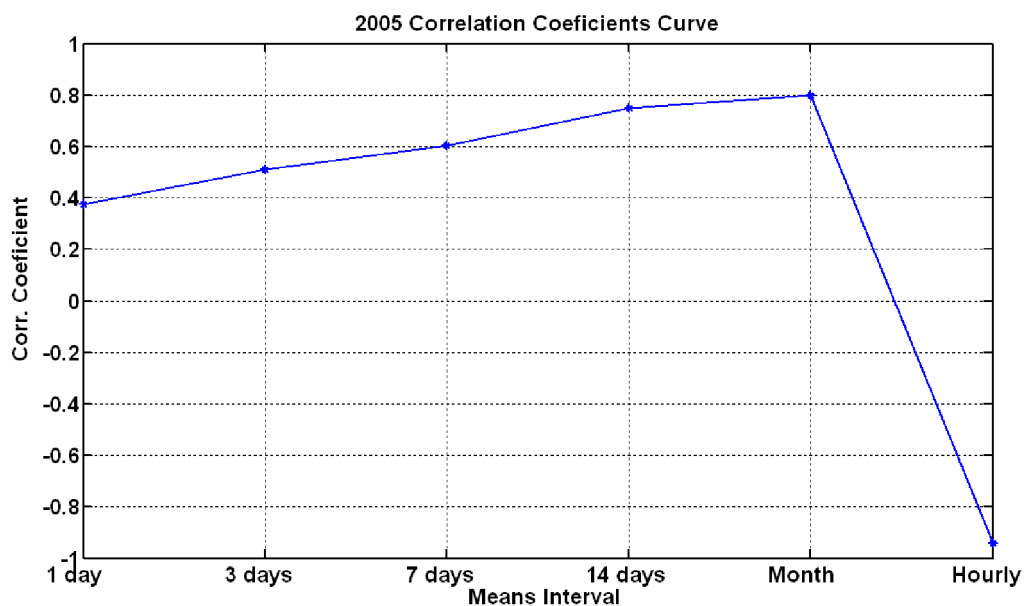


Figura 5-11 - Coeficientes de correlação entre a σ_χ e a Humidade Relativa, para várias médias efectuadas.

Os resultados das estatísticas cumulativas durante o ano de 2005 mostram que, tal como o observado com a temperatura, a variância da cintilação raramente excedeu 0.02dB^2 (equivalente a uma flutuação rms de $\pm 0.4\text{ dB}$). No entanto, verifica-se que para valores de humidade relativa mais elevados ocorrem períodos de cintilação mais intensa. O valor da variância da intensidade de cintilação residual de 0.005 dB^2 mantém-se.

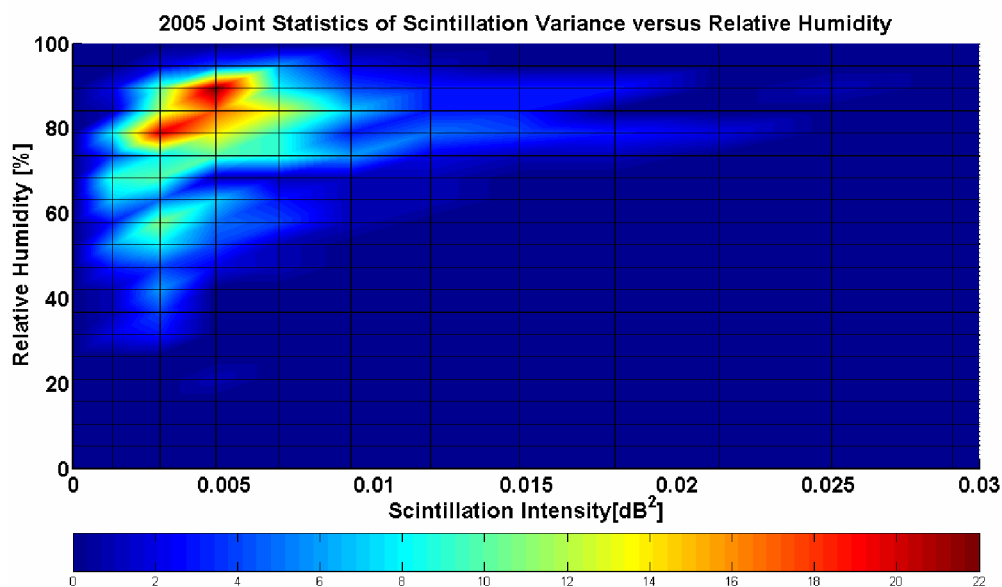


Figura 5-12 – Estatísticas conjuntas entre σ_χ^2 e Humidade Relativa.

Com os resultados obtidos a partir dos estudos efectuados, conclui-se que a humidade relativa, de uma forma independente, se correlaciona com o desvio padrão da cintilação. Esta

correlação entre os dois parâmetros aumenta quanto maior for intervalo da média. No entanto nestes casos a média anual de todas as horas revela uma dependência inversa, devido ao comportamento relativo entre a média horária da humidade relativa e a média horária do desvio padrão da cintilação.

5.3 Precipitação

A precipitação ocorre tipicamente durante menos que 3% do ano. Como se pode observar na Figura 5-13, a precipitação tem um comportamento sazonal. O ano de 2005 foi um ano em que a precipitação foi escassa. O mês de Outubro foi o mais chuvoso.

A Figura 5-14, que ilustra a média horária anual mostra que a precipitação - ao contrário da temperatura, humidade relativa e do vento - não tem um comportamento regular. Há uma ligeira tendência para uma menor precipitação durante o meio do dia pelo que dificilmente se poderá correlacionar com a intensidade da cintilação.

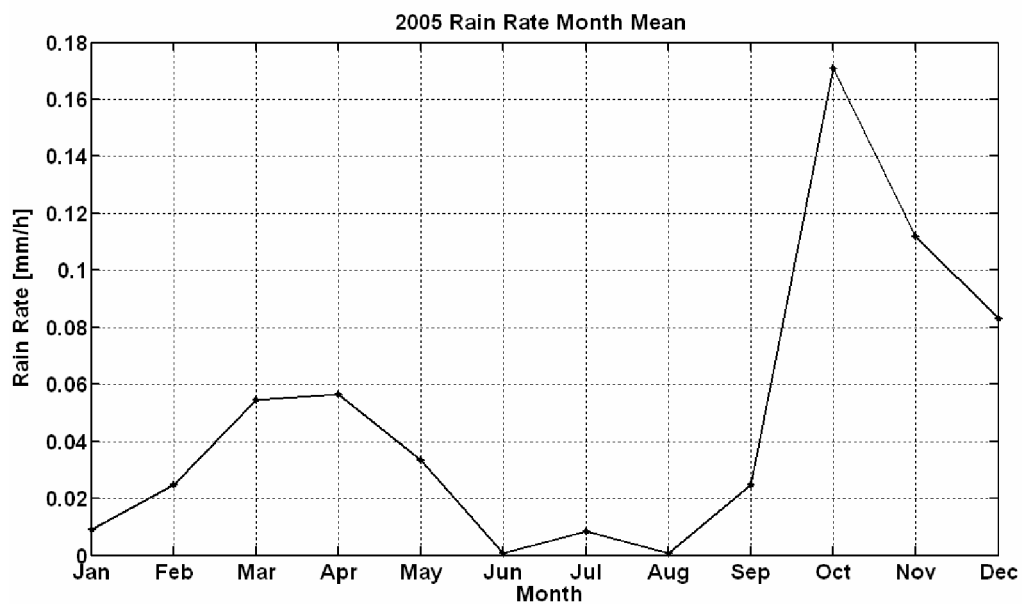


Figura 5-13 - Média mensal da Precipitação do ano de 2005.

Tendo em conta que associada à precipitação estão condições de existência de nuvens e concomitante perturbação e instabilidade atmosférica, poderão ocorrer eventos de cintilação de intensidade apreciável durante ou nas vizinhanças temporais de períodos de chuva [2]. No entanto deve-se ter especial cuidado na análise de eventos de atenuação profunda pois a dinâmica de atenuação pode dificultar a extracção da cintilação. Por outro lado, a SNR degrada-se aparentando o sinal uma variância acrescida.

Durante o processamento dos dados foram tratadas com especial cuidado estas ocorrências.

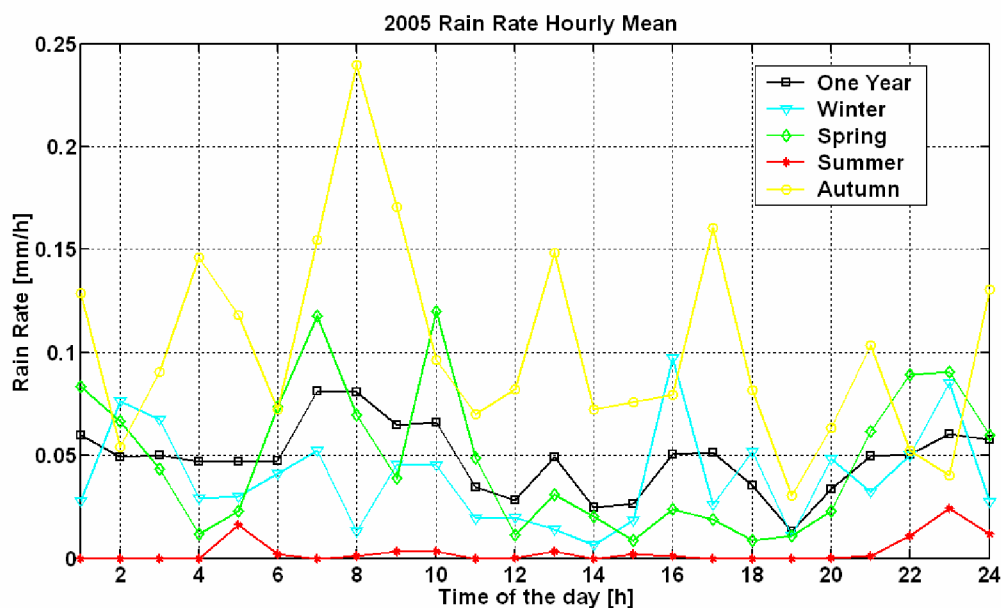


Figura 5-14 - Média horária e por estação do ano da Precipitação.

Como se pode observar na Figura 5-15, a correlação entre estes dois parâmetros –taxa de precipitação R e intensidade de cintilação- é bastante fraca para uma média diária. A análise não foi aprofundada porque, com o aumentar do intervalo da média da taxa de precipitação, o número de pontos decresce e ainda acentua mais a desconexão com a intensidade da cintilação. Verifica-se, de qualquer forma, que em dias de maior taxa de precipitação há um valor acrescido da intensidade da cintilação como seria de esperar dadas as condições atmosféricas subjacentes.

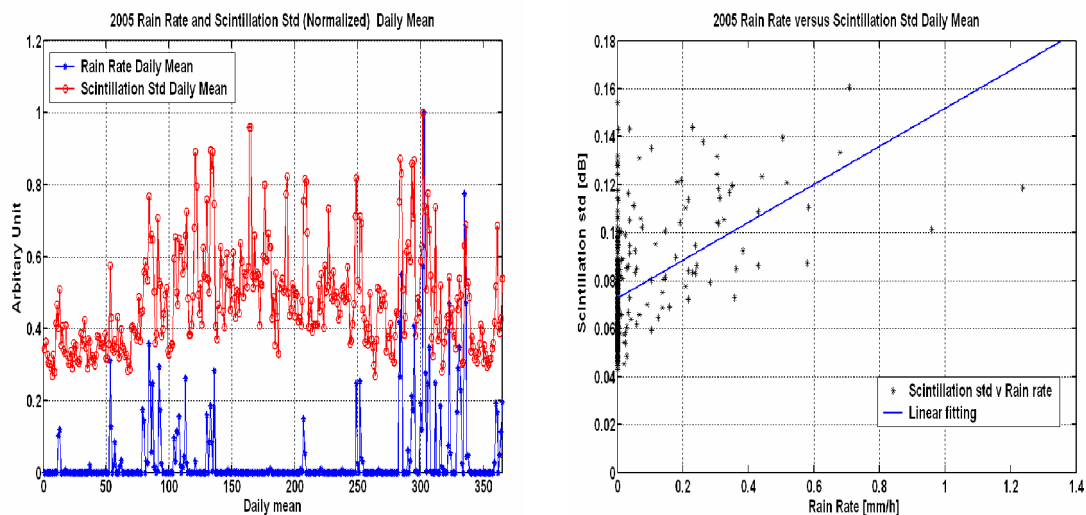


Figura 5-15 – Variação e Scatter plot da σ_x versus taxa de Precipitação para uma média diária.

A Figura 5-16 ilustra um exemplo da ocorrência de cintilação e de um evento de atenuação (devido a precipitação) sendo visível que antes e depois de evento de atenuação existe a ocorrência de cintilação com amplitude significativa. Este comportamento pode ser devido a turbulência existente dentro das nuvens que posteriormente irão dar origem à precipitação. As variações de

menor frequência, que ocorrem aquando do evento de atenuação, podem dever-se ao facto do filtro usado na extracção da cintilação não acompanhar variações mais rápidas do nível de sinal ou, por outro lado, a SNR ser mais reduzida.

Com este exemplo, constata-se que mesmo fora dos períodos de atenuação significativa devido a precipitação, ocorrem eventos de cintilação, o que indica a desconexão entre estes dois parâmetros verificada com os resultados aqui apresentados.

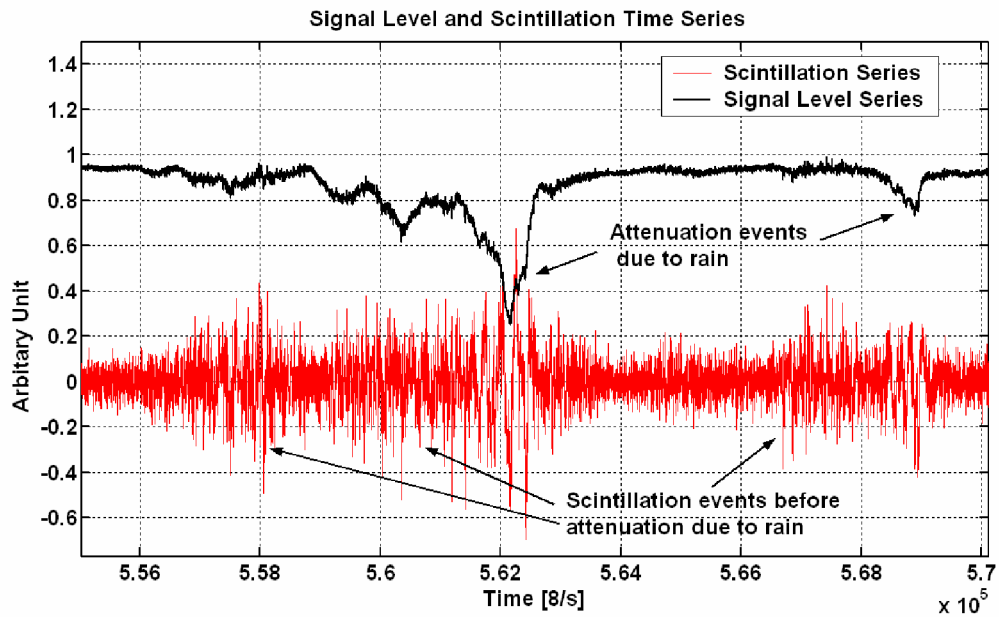


Figura 5-16 - Séries temporais de nível de sinal e cintilação de um período de precipitação do dia 10 de Outubro de 2005.

Ainda no âmbito do estudo realizado entre precipitação e a intensidade da cintilação, foram obtidas a partir do software de processamento estatístico, as estatísticas conjuntas - Figura 5-17 - entre a atenuação e a intensidade da cintilação.

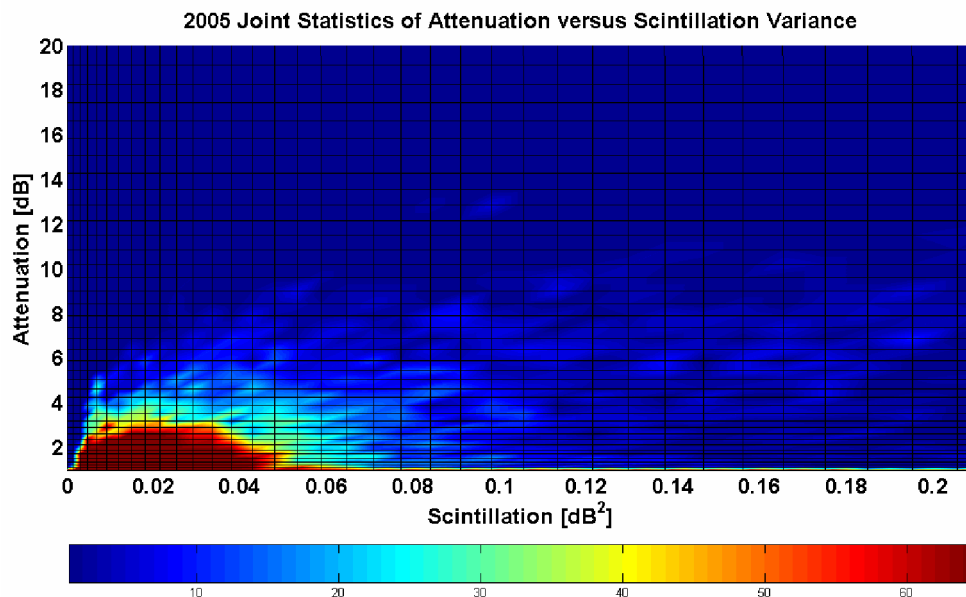


Figura 5-17 - Estatísticas conjuntas entre σ_{χ}^2 e a Atenuação.

Através da análise destes resultados, observa-se uma tendência de ocorrência de períodos com intensidade de cintilação elevada corresponderem a atenuações mais significativas. Esta tendência está em parte relacionada com o facto de atenuações mais profundas corresponderem a valores inferiores de SNR. Uma análise mais cuidada implica a apresentação dos valores dos percentis na figura anterior e a imposição, para efeitos de comparação, da variância residual em função da atenuação usando a CNR em céu limpo. Este tipo de dependência já foi analisado por alguns investigadores e verifica-se um aumento da intensidade de cintilação com a atenuação.

Após a análise dos resultados obtidos, podemos concluir que este parâmetro, analisado desta forma isolada, não terá grande relevância no estudo das estatísticas cumulativas de cintilação pois a atenuação devido a precipitação é de facto uma porção temporal mínima do tempo de colecção dos dados. No entanto, podem ocorrer eventos significativos de cintilação nos momentos que antecedem a precipitação devido a fenómenos em redor e nas células de chuva. As células de precipitação de origem convectiva, por exemplo, têm fases de desenvolvimento com movimentações de massas de ar que se deslocam com elevada velocidade de várias direcções. Esta dependência poderá merecer interesse em sistemas de contra medida pois a cintilação poderá nestes instantes não ser totalmente descorrelacionada com a atenuação.

5.4 Cobertura de nuvens

O estudo do capítulo anterior poderia ser complementado através da investigação da influência das nuvens no fenómeno de cintilação. O trabalho não foi realizado devido à falta de dados sobre este parâmetro meteorológico. Apresentam-se resultados muito limitados no tempo que

foram obtidos pela consulta automatizada de uma página web de previsão do tempo que fornecia a percentagem de cobertura de nuvens. Uma tentativa de conseguir dados através dos serviços meteorológicos também foi infrutífera.

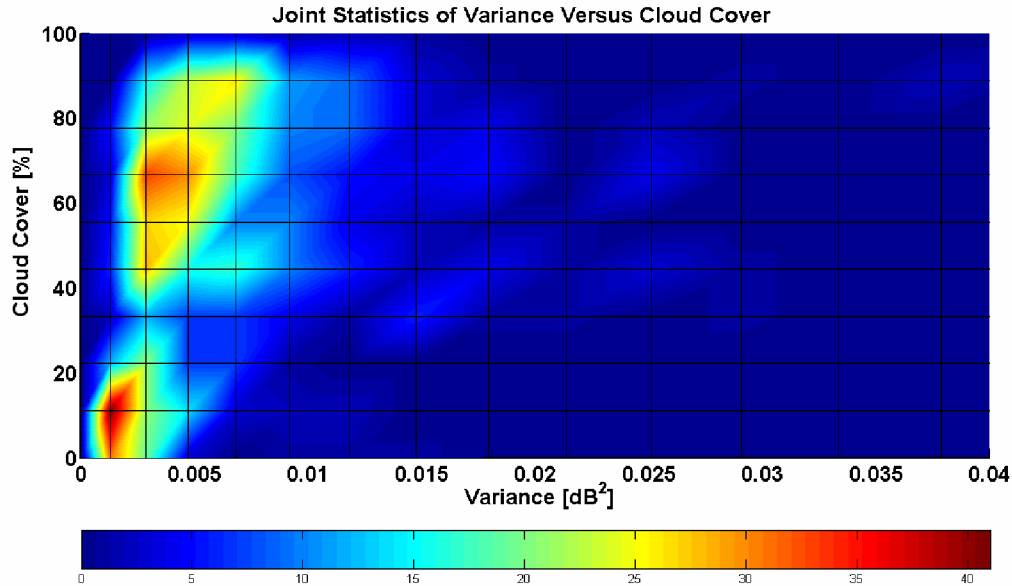


Figura 5-18 - Estatísticas conjuntas entre σ_{χ}^2 e a Percentagem de Cobertura de Nuvens para os meses Abril, Maio e Junho de 2005.

A Figura 5-18 ilustra os resultados das estatísticas conjuntas entre a intensidade da cintilação e a percentagem de cobertura de nuvens. Apesar da pequena quantidade de dados recolhidos (menos de dois meses) é possível observar que a intensidade de cintilação aumenta para percentagens de cobertura superiores. Este resultado sugere a existência de uma boa relação entre a existência de nuvens e a intensidade de cintilação, relação essa já verificada por alguns investigadores [28], [35].

5.5 Velocidade do vento

O vento é um parâmetro meteorológico que assume quase sempre valores acima de 0.5m/s. Será de esperar que em determinados meses do ano seja mais intenso em termos médios, como se pode observar na Figura 5-19.

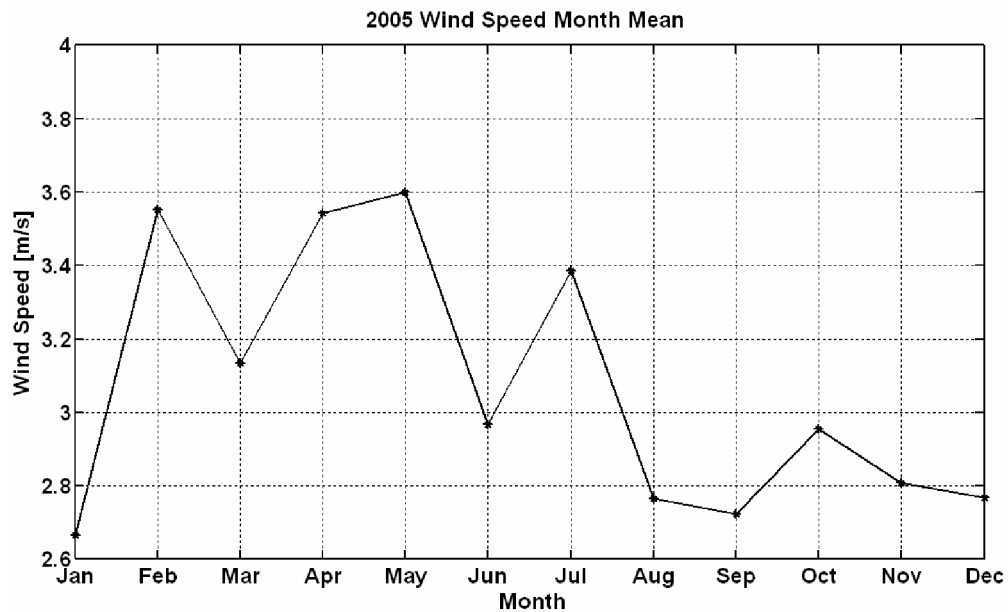


Figura 5-19 - Média mensal da Velocidade do Vento.

A variação diária - Figura 5-20 - da velocidade do vento tem um comportamento similar ao longo do ano e também entre estações do ano. A Figura 5-20, que representa a média horária anual, mostra que durante a tarde a velocidade do vento atinge valores mais elevados. Ainda podemos observar que durante as estações do ano mais quentes a velocidade do vento é superior.

O fim do Verão, Outono e início do Inverno são os períodos de maior acalmia que contrastam grandemente com a Primavera e Verão. Durante os meses de Verão a gama dinâmica da velocidade do vento é superior à verificada nas restantes estações do ano. Este comportamento pode ser devido à localização geográfica de Aveiro: uma zona muito plana e próxima da costa.

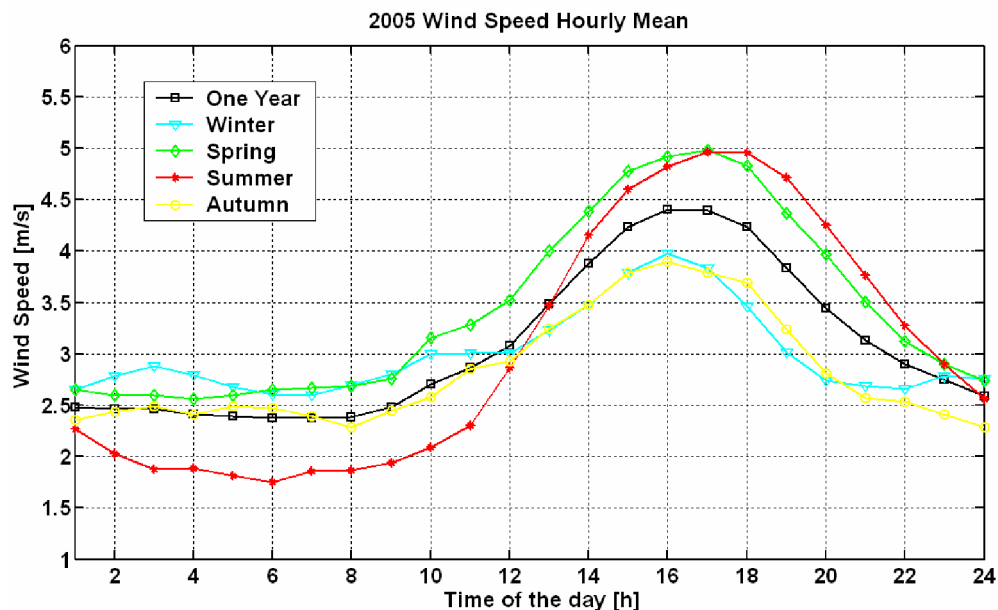


Figura 5-20 – Velocidade do vento: Média horária anual e de cada estação do ano.

Na análise da correlação entre a velocidade do vento e a intensidade da cintilação não foi considerada a direcção do vento pois esta variável não estava disponível. Após a análise dos dados, efectuando as médias sobre os períodos de tempo referidos anteriormente, verificou-se que estes dois parâmetros têm uma correlação bastante fraca, mesmo para a média mensal.

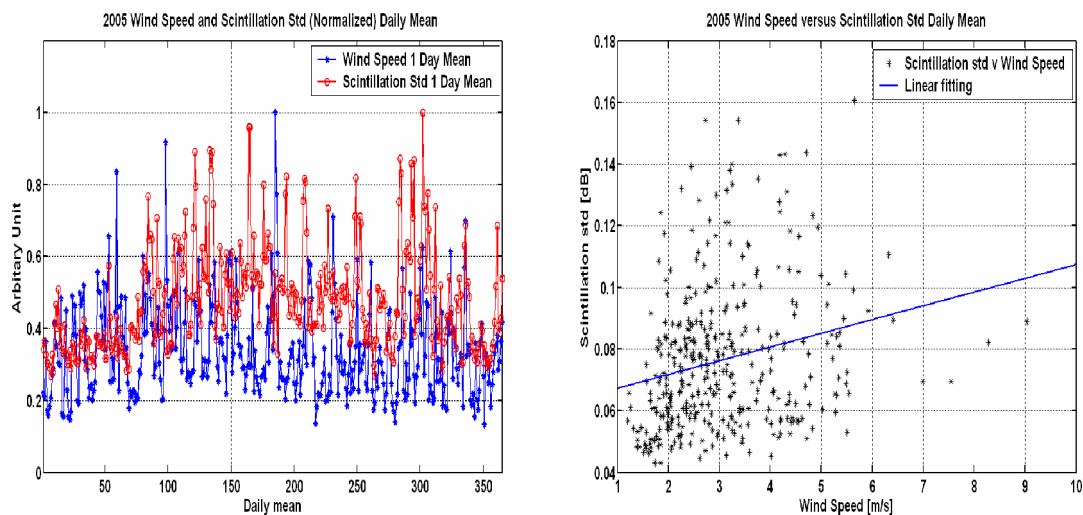


Figura 5-21 – Variação e *Scatter plot* da σ_χ versus Velocidade do Vento para uma média diária.

Apresenta-se como exemplo a Figura 5-21 que ilustra uma grande variabilidade horária da velocidade do vento. Esta variabilidade reflecte-se no gráfico de *scatter plot* onde se pode observar uma elevada dispersão.

Apesar das aproximações feitas com médias de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 14 dias e 1 mês terem uma fraca correlação com a intensidade da cintilação, a média anual horária, apresenta uma correlação bastante significativa como se pode observar na Figura 5-22. Este resultado deve-se ao facto da velocidade do vento ter um comportamento muito irregular de dia para dia, em termos médios. Enquanto que ao longo de cada dia do ano o seu comportamento mostra ser muito regular, tal como a acontece com a temperatura, verifica-se uma relação proporcional com a intensidade da cintilação.

A partir de análise do *scatter plot*, verificamos a presença de histerese para valores de velocidade do vento superiores a 2.7m/s. O vento parece que por si só não tem um efeito determinante na ocorrência de cintilação, no entanto verifica-se, através dos resultados obtidos, uma boa correlação entre ambos a nível horário. Não foi encontrada na literatura nenhuma referência à presença de histerese na relação entre a velocidade do vento e a intensidade da cintilação. No entanto, em alguns dos estudos realizados, foi também obtida uma fraca correlação entre ambos os parâmetros, como é o caso do estudo realizado por A. Savvaris e al [32]. Neste mesmo estudo, é referido que a média horária possui uma fraca correlação o que contradiz o resultado aqui obtido. No entanto é preciso ter em conta que, como já foi referido, o resultado aqui

apresentado reflecte uma média anual de cada hora do dia e não a média de uma hora para o ano em questão. Daí a fraca correlação, pois a aproximação usada por estes autores não representa o comportamento do vento ao longo do dia.

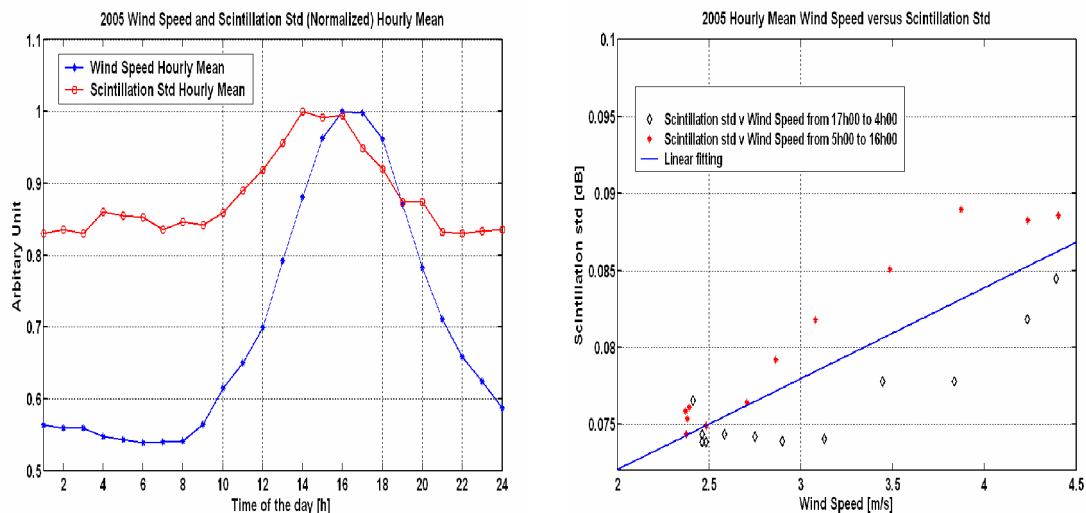


Figura 5-22 – Variação e Scatter plot da σ_χ versus Velocidade do Vento para uma média horária anual.

Na Tabela 5-1 estão referenciados os valores obtidos no cálculo da correlação entre intensidade da cintilação e a velocidade do vento, para as várias aproximações. Nesta podemos confirmar a fraca correlação na maior parte das aproximações, no entanto, a média anual horária tem um coeficiente de correlação bastante significativo.

Médias	σ_χ versus Velocidade do Vento
Diária	0.2310
3 dias	0.2153
7 dias	0.2130
14 dias	0.2875
Mensal	0.2782
Horária	0.8346

Tabela 5-1 – Coeficientes de correlação entre σ_χ e Velocidade do Vento, para as várias médias.

O resultado das estatísticas conjuntas é mostrado na Figura 5-23 onde se verifica, tal como nas análises anteriores, que no ano de 2005 não se registaram eventos de cintilação muito significativos. Continua-se a observar com este resultado a existência de um valor residual da variância de cintilação da ordem de 0.005dB^2 .

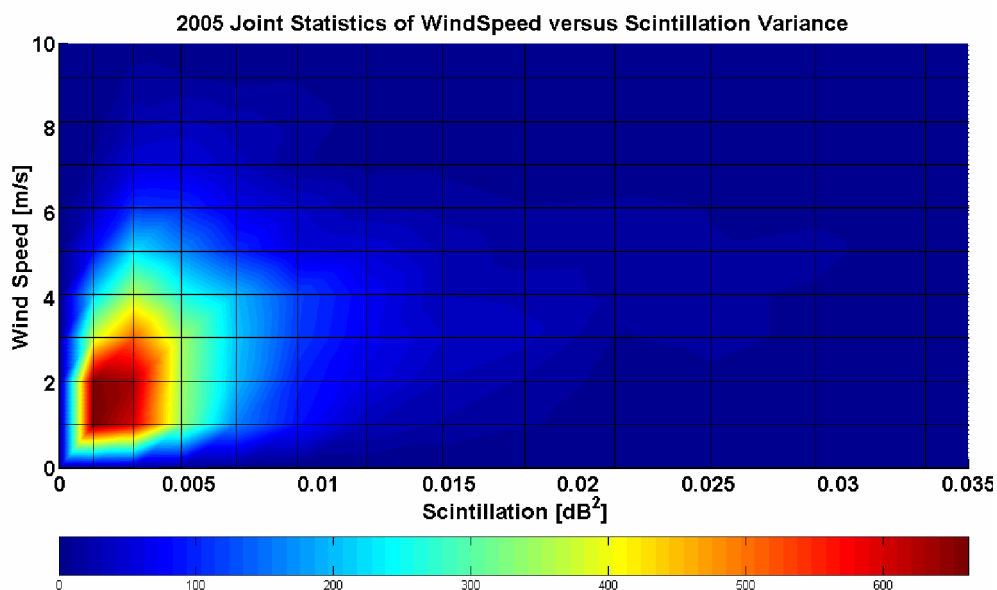


Figura 5-23 - Estatísticas conjuntas entre σ_{χ}^2 e a Velocidade de Vento.

Conclui-se que a relação entre a velocidade do vento, como um parâmetro isolado, e a intensidade da cintilação é muito fraca na maior parte das médias temporais usadas. A média anual horária é a única aproximação que relaciona os dois parâmetros de uma forma razoável. Contudo, o vento apresenta uma variação diurna em tudo semelhante à temperatura.

Esta fraca relação entre a velocidade do vento e a intensidade da cintilação foi também verificada por I. E. Otung e outros investigadores [32] [50]. Estes autores tiveram em consideração a direcção do vento e usaram apenas a componente transversal à ligação. Também o factor nuvens foi considerado como condição para análise nesses estudos.

A nível físico deve-se ter em conta que as medições da velocidade do vento são efectuadas ao nível do receptor, sendo que o comportamento do vento poderá ser completamente diferente em altitude. A ocorrência destes ventos a maior altitude pode introduzir turbulência potenciando o aumento da intensidade de cintilação em altitude.

5.6 Factores usados em modelos dependentes de parâmetros meteorológicos (N_{wet} , $N_{\text{wet}}+Q$)

Neste sub-capítulo são apresentados os resultados da refractividade (N_{wet}) já descrita no capítulo 3.

Esta função apresenta uma variabilidade significativa de dia para dia mas que tende a tornar-se mais regular para médias de longa duração, por exemplo, mensal. Este resultado já seria expectável tendo em conta que este parâmetro é uma função da temperatura e da humidade relativa.

Na Figura 5-24 apresenta-se a média diária do parâmetro N_{wet} para os três modelos principais: ITU, Karasawa e van de Kamp. A fórmula de cálculo dos primeiros dois modelos é diferente mas dá resultados praticamente iguais. O modelo de van de Kamp adiciona o termo relacionado com o conteúdo de água líquida das nuvens carregadas obtido como média anual. O N_{wet} é um parâmetro que exhibe uma variação suave e tem uma média anual superior ao valor de uma atmosfera standard que é de 40N.

Os resultados apresentados na Figura 5-24 mostram uma gama dinâmica do N_{wet} significativa, sendo que os valores obtidos nesta campanha estão próximos dos obtidos noutras campanhas [35].

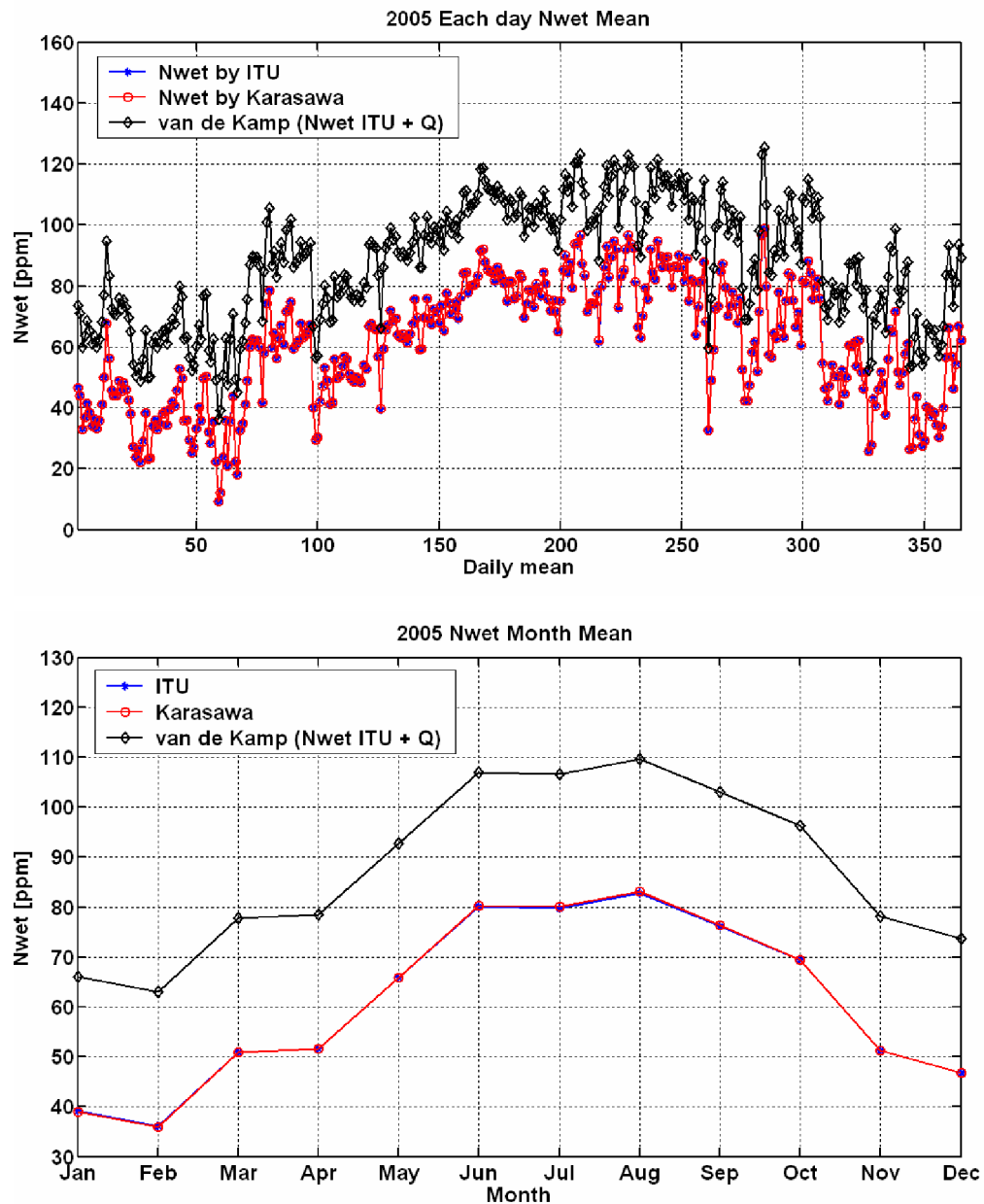


Figura 5-24 – Variabilidade diária e mensal do N_{wet} e $N_{wet} + Q$.

O N_{wet} tem uma variação diária suave e quase constante: a sua gama dinâmica é da ordem de 5ppm. Este resultado já seria expectável pois os dois parâmetros meteorológicos que lhe dão origem também têm um comportamento diário bastante regular e compensam-se no cálculo da refractividade.

Os valores obtidos através das fórmulas do modelo ITU e de Karasawa, para a média horária anual, são semelhantes aos obtidos no estudo realizado por A. Savvaris e E. Otung [45].

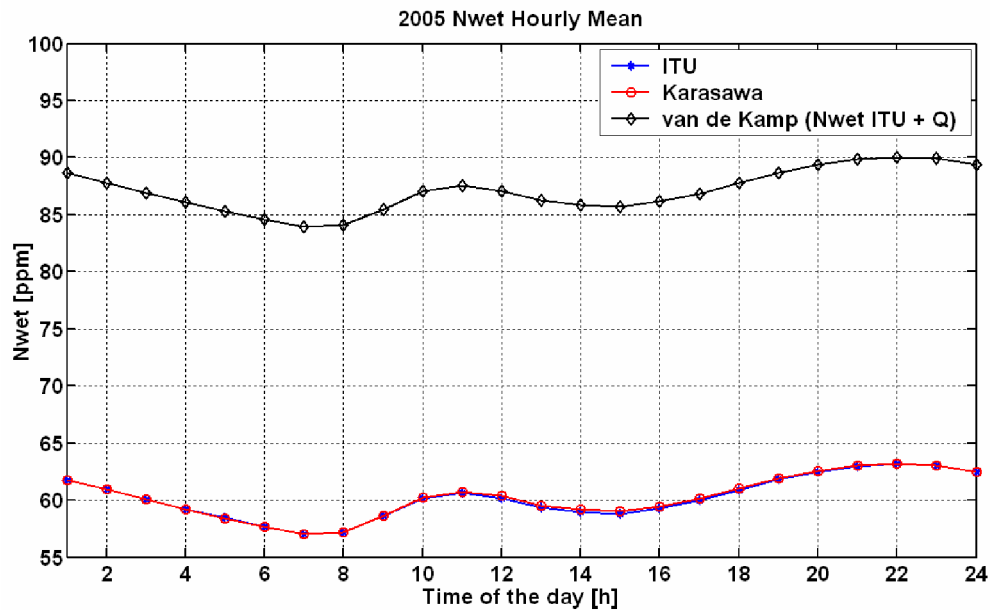


Figura 5-25 - Média horária do N_{wet} anual.

A correlação do N_{wet} com a intensidade da cintilação foi avaliada somente para a média mensal e média horária anual ou seja as médias de maior duração. Esta decisão baseou-se nos resultados obtidos da análise isolada de cada um dos parâmetros meteorológicos. van de Kamp chegou igualmente à conclusão que a correlação entre o N_{wet} e a intensidade da cintilação melhora consideravelmente com o aumento do intervalo das médias [42].

A Figura 5-26 mostra a média mensal entre a intensidade da cintilação e o N_{wet} . Verifica-se que a correlação, obtida neste estudo, é inferior aos valores obtidos noutras experiências [35].

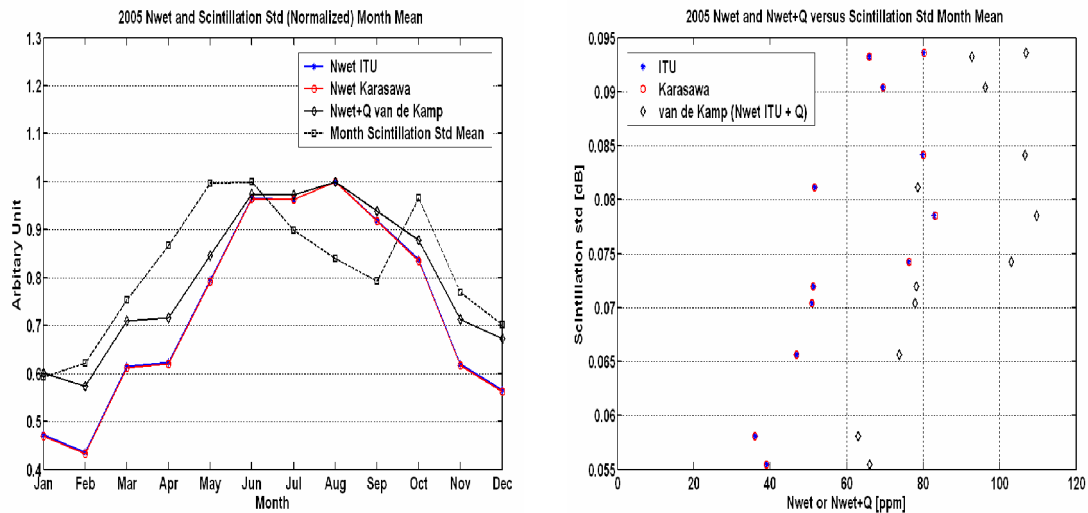


Figura 5-26 - Variação e Scatter plot da σ_χ versus N_{wet} e $N_{wet} + Q$ para uma média mensal.

A correlação entre os dois parâmetros usando a média horária numa base anual - Figura 5-27 – é bastante fraca e também negativa. Este resultado já seria de esperar tendo em conta que a função do N_{wet} é proporcional à humidade relativa e que este parâmetro meteorológico mostrou-se igualmente descorrelacionado com a intensidade da cintilação, nestas condições.

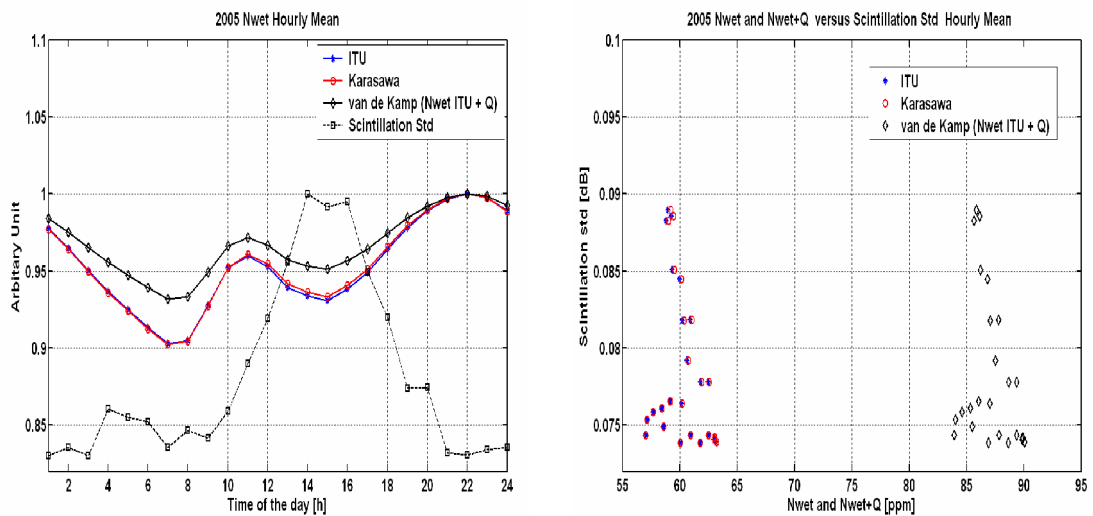


Figura 5-27 – Variação e Scatter plot de σ_χ versus N_{wet} e $N_{wet} + Q$ para uma média horária anual.

Os coeficientes de correlação entre N_{wet} e a intensidade de cintilação são apresentados no próximo capítulo (Tabela 6-1). Embora a tabela refira correlação entre a intensidade da cintilação medida e a intensidade da cintilação obtida no modelo ITU, os valores apresentados são iguais para a correlação entre N_{wet} e a intensidade de cintilação medida.

A partir dos resultados obtidos da análise efectuada, verifica-se que a correlação entre os dois parâmetros para o ano de 2005 está abaixo do que foi obtido por outros investigadores. Esta diferença pode dever-se às condições climáticas atípicas observadas durante o ano de 2005 nesta

região, ou por outro lado devido à localização geográfica. Também não pode ser desprezada a possibilidade dos modelos apresentados não se adaptarem da melhor forma ao nosso local.

Este resultado reflecte-se no cálculo da intensidade de cintilação através dos modelos apresentados no capítulo 3.6, pois são dependentes deste parâmetro.

6 Validação dos dados adquiridos e dos modelos existentes

Neste capítulo são apresentadas essencialmente as distribuições da amplitude e da intensidade da cintilação.

No capítulo 6.1 é efectuada uma comparação entre dados medidos e os resultados obtidos a partir de alguns modelos de longa duração, descritos no capítulo 3.6. Com este estudo pretende-se verificar qual ou quais os modelos que melhor se adaptam ao nosso local.

No capítulo 6.2 são estudadas as distribuições da amplitude de cintilação e da intensidade da cintilação que resultam dos dados medidos e dos resultados obtidos a partir de modelos teóricos.

6.1 Resultados de longa duração

Para uma análise de longa duração foram aplicados aos modelos a média mensal e horária anual dos dados meteorológicos.

A Figura 6-1 confirma o referido no parágrafo anterior, pois verifica-se a decorrelação entre a intensidade da cintilação medida e a obtida pelos modelos, principalmente entre as 11 e as 21 horas.

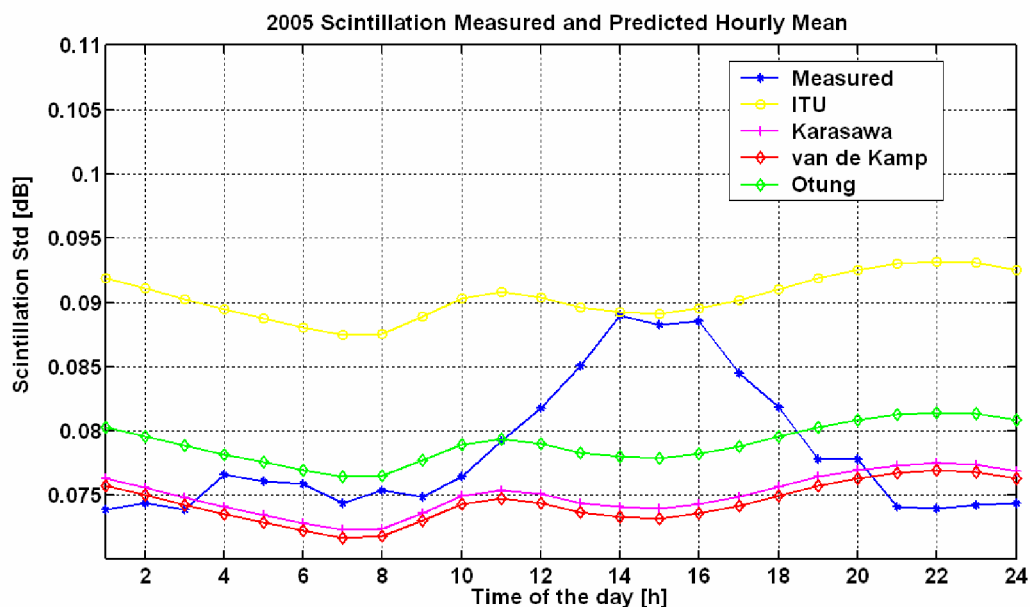


Figura 6-1 - Média horária da $\sigma_{\chi,medido}$ e $\sigma_{\chi,prev}$ anual.

Tal como na análise anterior, com aplicação dos dados aos modelos obtiveram-se resultados semelhantes aos do capítulo 5.6. Verifica-se que é nos meses de Verão que a cintilação

medida apresenta uma correlação menor com os modelos. Nos restantes meses do ano observa-se uma evolução similar entre os dados medidos e os resultados obtidos pelos modelos.

De todos os modelos usados nas análises efectuadas o modelo de intensidade de cintilação proposto por E. Otung [41] é o que mais se aproxima dos valores medidos durante algumas horas da manhã.

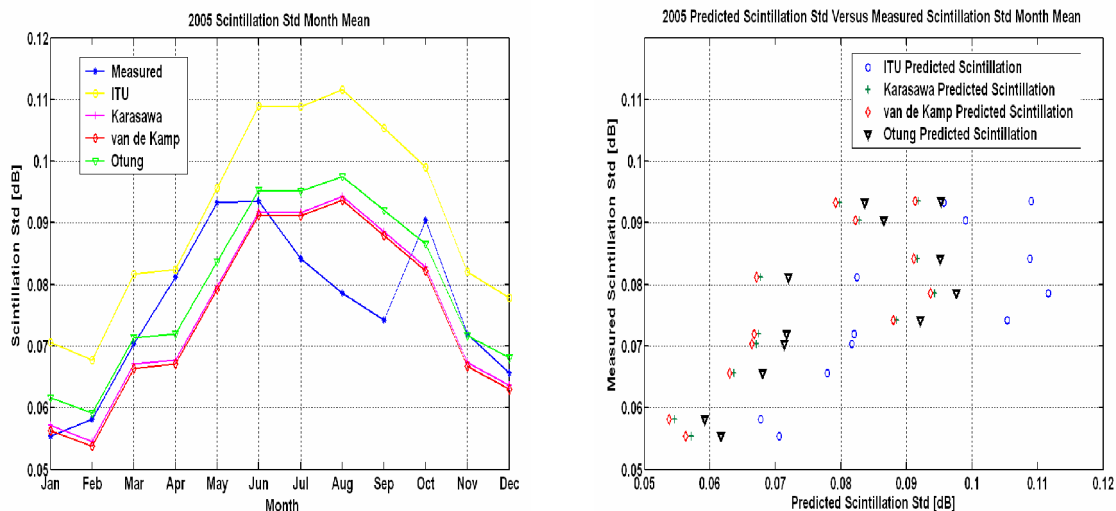


Figura 6-2 - Variação e Scatter plot de $\sigma_{\chi, \text{medido}}$ versus $\sigma_{\chi, \text{prev}}$ para uma média mensal.

A Tabela 6-1 resume os coeficientes de correlação entre os dados medidos e os do modelo ITU para as várias médias temporais. A partir desta tabela verifica-se que o coeficiente de correlação entre os resultados medidos e os calculados vai aumentando com o incremento do intervalo da média, com a excepção da média horária numa base anual. Na tabela não são apresentados os coeficientes de correlação dos restantes modelos pois são iguais aos obtidos pelo modelo ITU.

Médias	ITU
Diária	0.5527
3 dias	0.6335
7 dias	0.7138
14 dias	0.7468
Mensal	0.7643
Horária	-0.2710

Tabela 6-1 - Coeficientes de correlação entre $\sigma_{\chi, \text{medido}}$ e ITU $\sigma_{\chi, \text{prev}}$, para as várias médias.

Dos resultados obtidos conclui-se que nenhum dos modelos estudados descreve os dados experimentais especialmente nos meses de Julho, Agosto e Setembro. Este resultado pode dever-se à fraca presença de turbulência nos níveis mais elevados da atmosfera durante este período do ano,

apesar das condições meteorológicas ao nível do receptor serem favoráveis à ocorrência de maior intensidade de cintilação.

O modelo ITU prevê, de qualquer forma, uma intensidade de cintilação sistematicamente superior aos dados experimentais. No entanto, será necessária a análise de um período experimental mais longo para que se possa efectuar uma melhor validação dos modelos.

6.2 Distribuições

Neste sub-capítulo são apresentados os resultados das distribuições de *enhancements* e *fades* medidos e a sua comparação com os obtidos a partir de modelos.

É também realizado o estudo da distribuição experimental obtida da intensidade da cintilação com os resultados obtidos a partir dos modelos de E. Otung [41] e van de Kamp [35].

6.2.1 Distribuições Cumulativas dos *fades* e *enhancements*

Para o estudo das distribuições dos *enhancements* e dos *fades* foram calculadas, na rotina de apresentação de resultados, as fórmulas referentes aos modelos: ITU [21], Karasawa [38], van de Kamp [35] e Otung [41] descritos no capítulo 3.6.

A Figura 6-3 apresenta os resultados das distribuições mensais de *enhancements* e de *fades*. Os *fades* têm, para uma mesma probabilidade, uma maior amplitude que os *enhancements* confirmando o que foi referido no capítulo 3.2. Contudo a diferença, à semelhança de outros dados publicados, não parece ser tão significativa quanto o previsto pelos modelos disponíveis.

A diferença é mais evidente para meses em que a intensidade da cintilação é mais elevada como seria de esperar: Maio, Junho e Outubro. Nos meses de fraca cintilação a probabilidade de um determinado *fade* e *enhancement* é praticamente igual.

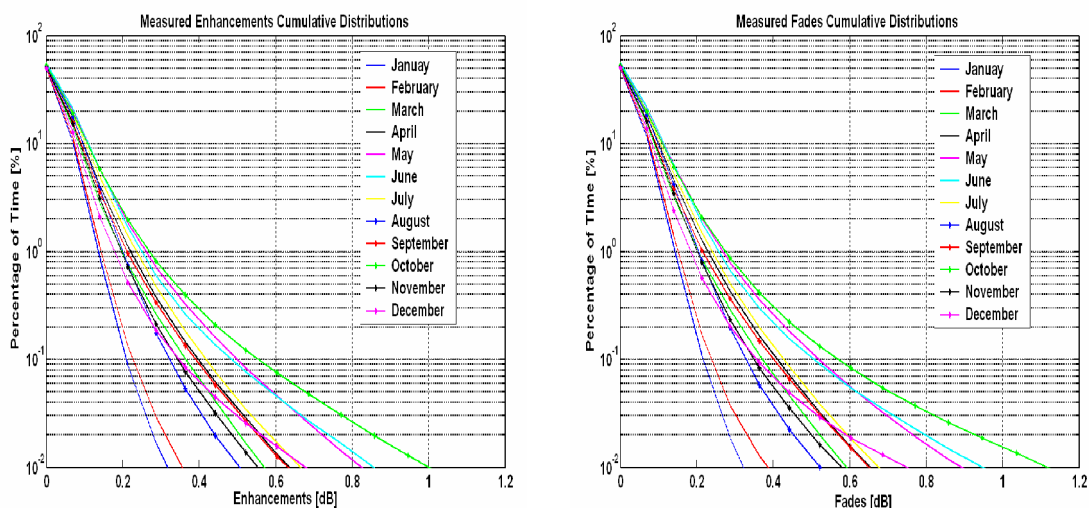


Figura 6-3 – Distribuição mensal de *enhancements* e *fades* para os dados medidos.

Como já foi referido foram calculados os valores previstos por alguns modelos: a Figura 6-4 compara as previsões dos modelos implementados com os dados experimentais. Os gráficos apresentam as distribuições referentes à totalidade do ano de 2005.

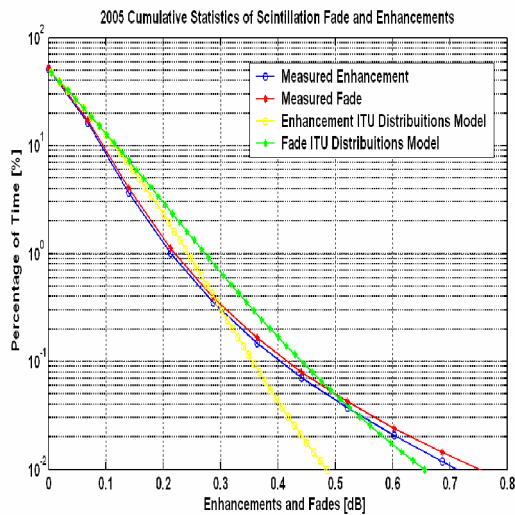
Nesta figura pode-se verificar que os resultados obtidos a partir de modelos têm, tal como os resultados da campanha experimental, *fades* de maior amplitude do que os correspondentes *enhancements*.

O modelo sugerido pelo ITU - Figura 6-4 a) – apresenta valores semelhantes aos dados experimentais. O modelo ITU sobredimensiona o valor dos *fades* e *enhancements* até cerca de 0.2% sendo que para percentagens de tempo inferiores subdimensiona estes valores, principalmente os *enhancements*.

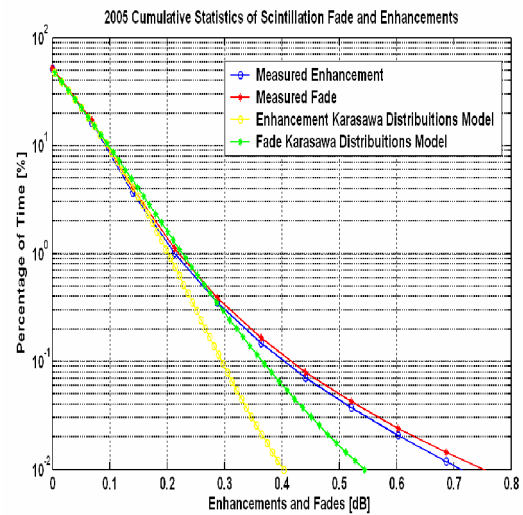
O modelo de Karasawa - Figura 6-4 b) – é o que descreve com mais rigor as distribuições dos dados experimentais entre 50% a 1%. Para percentagens de tempo inferiores o modelo subestima tanto os *fades* como os *enhancements*.

As distribuições propostas por van de Kamp - Figura 6-4 c) - tem um comportamento similar ao modelo ITU, embora prevendo menores amplitudes. Este modelo prevê uma diferenciação entre as distribuições de *fades* e *enhancements* para uma amplitude inferior aos restantes modelos. O modelo dá uma razoável aproximação da distribuição dos *fades* contudo subestima os *enhancements* de uma forma quase sistemática.

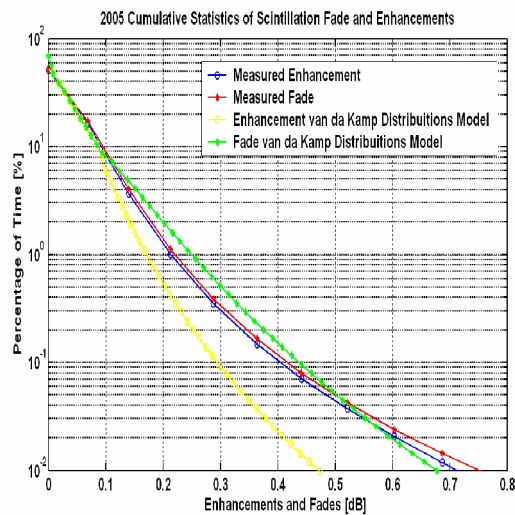
Dos quatro modelos aqui estudados só o modelo proposto por E. Otung - Figura 6-4 d) - sobrestima consideravelmente os resultados para percentagens de tempo da ordem de 1%. No entanto, para percentagens até 1%, este modelo aproxima-se também dos dados medidos.



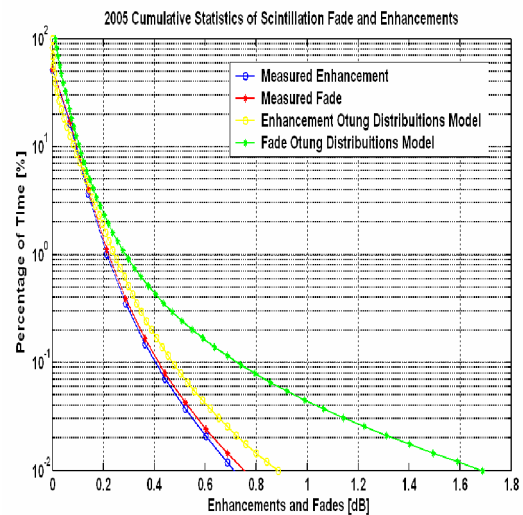
a) Modelo ITU-R P.618-8



b) Modelo de Karasawa



c) Modelo van de Kamp



d) Modelo E. Otung

Figura 6-4 – Distribuição anual de *enhancements* e *fades* medidos e calculados por modelos.

As distribuições obtidas para os dados experimentais têm então um comportamento semelhante, embora com valores inferiores, às apresentadas por outros autores, como por exemplo J. Tervonen [28] e E. Otung [41]. No entanto, deve-se ter em conta que se estão a comparar resultados com modelos obtidos em localizações geográficas e condições meteorológicas distintas, podendo estes factores estar na causa dessas diferenças de valores.

Após analisar os resultados provenientes dos modelos estudados, conclui-se que nenhum se aproxima dos dados reais de uma forma satisfatória para todas as percentagens de tempo. No entanto, verifica-se que na previsão de *fades* o modelo de van de Kamp se aproxima de uma forma razoável dos resultados reais. Já para os *enhancements* é o modelo proposto por Otung que melhor se adapta. Apesar destes dois modelos acompanharem os parâmetros de uma forma aceitável para maior parte da percentagem de tempo, não o fazem para os dois parâmetros ao mesmo tempo.

Uma aproximação bastante satisfatória é a apresentada pelo modelo de Karasawa para percentagens de tempo entre 50% e 0.2%: dentro deste intervalo as curvas das distribuições quase se sobrepõem. O mesmo foi verificado pelos resultados apresentados por Karasawa no artigo onde apresenta o seu modelo [38].

Conclui-se dos resultados experimentais a não distinção apreciável entre *fades* e *enhancements*, como se poderia estar à espera. O facto de neste ano não se ter verificado uma intensidade de cintilação muito significativa está na origem deste resultado, levando a que a probabilidade da amplitude de *fades* seja muito próximo à de *enhancements*.

6.2.2 Distribuições da intensidade de cintilação

A Figura 6-5 apresenta os resultados mensais das distribuições cumulativas da intensidade e densidade de probabilidade de σ_x .

No gráfico que apresenta a função densidade de probabilidade observa-se que nos meses em que a intensidade é reduzida, a distribuição é mais simétrica no entanto esta simetria vai diminuindo com o aumento da intensidade da cintilação. Conclusões semelhantes também foram obtidas por J. K. Tervonen, com dados da campanha de medições realizada em Kirkkonummi [28].

De facto, a distribuição originalmente proposta para a intensidade de cintilação, que serviu de base aos primeiros modelos, era gaussiana mas posteriormente outros investigadores sugeriram distribuições que justificavam a assimetria verificada para medições com intensidade de cintilação mais elevada. As distribuições obtidas nesta campanha carecem ainda de uma análise mais aprofundada para avaliar a adequação das distribuições propostas na literatura.

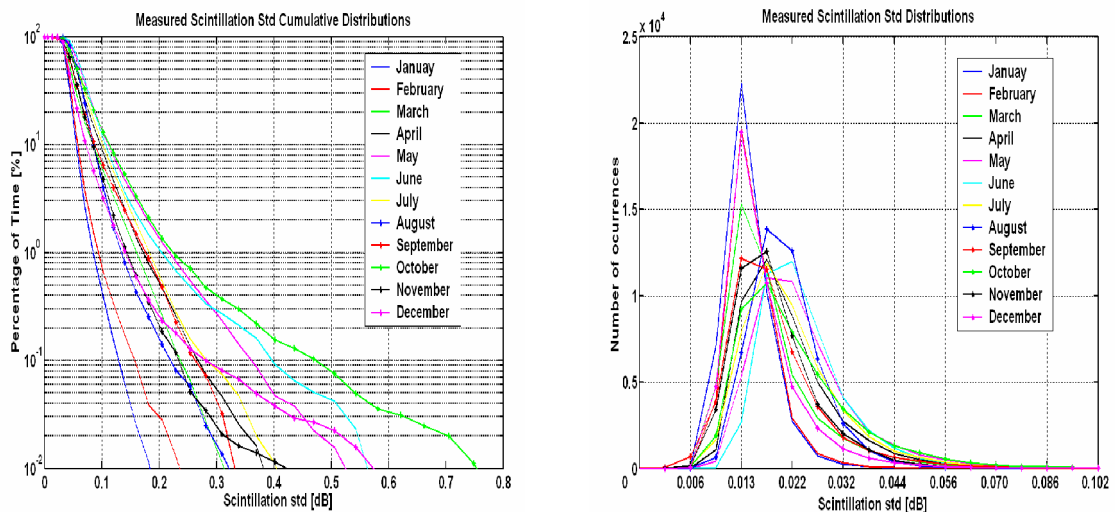


Figura 6-5 – Distribuição cumulativa e densidade de probabilidade de σ_x .

Para o estudo estatístico da intensidade procedeu-se à comparação dos dados, Figura 6-6, com os modelos: van de Kamp e E. Otung.

A partir da Figura 6-6 verifica-se que a intensidade de cintilação é mais significativa apenas em 10% do tempo, nos restantes 90% o seu valor é inferior o que confirma uma sobrestimativa dos modelos.

O modelo proposto por E. Otung ainda acompanha os dados reais até cerca de 10 % mas a partir dessa percentagem afasta-se sobre dimensionando os valores da intensidade de cintilação.

A curva obtida pelo modelo de van de Kamp não se aproxima dos dados experimentais no entanto, no que diz respeito aos valores da intensidade, este modelo não se afasta de uma forma tão vincada quanto o de E. Otung.

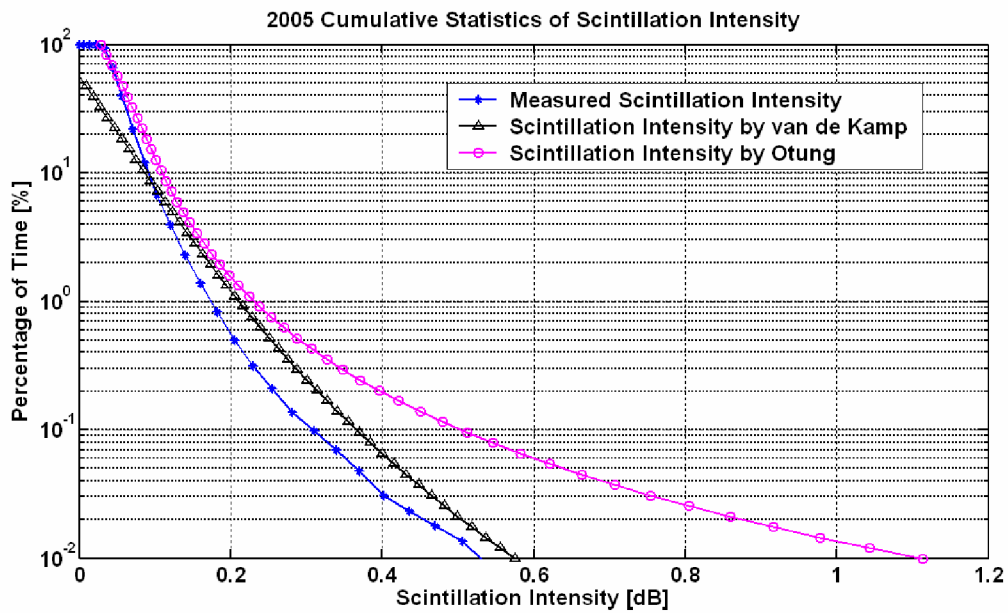


Figura 6-6 – Distribuição Cumulativa $\sigma_{\chi, \text{medido}}$ e $\sigma_{\chi, \text{prev}}$

Do estudo realizado neste sub-capítulo conclui-se que nenhum dos modelos aqui analisados descreve, de uma forma eficiente, os resultados experimentais para todas as percentagens de tempo.

7 Conclusões e trabalho futuro

No âmbito desta tese foi criada uma base de dados de cintilação a partir da campanha de medidas realizada entre Janeiro e Dezembro de 2005 em Aveiro. Foram ainda desenvolvidas importantes ferramentas de análise de dados que foram testadas e usadas na exploração dos dados experimentais recolhidos. Os resultados estatísticos apresentados, pretendem contribuir com mais informação de carácter experimental para o estudo do fenómeno de cintilação.

Após uma breve introdução geral ao tema da tese no primeiro capítulo, foi efectuada uma descrição breve sobre a propagação de ondas na atmosfera. No segundo capítulo foram descritos alguns dos parâmetros meteorológicos relevantes para a cintilação. O capítulo termina com um breve descrição sobre três dos fenómenos de propagação mais importantes: a atenuação, a despolarização e a cintilação. Foram ainda apresentados resultados experimentais obtidos no decorrer deste trabalho que, embora mesmo fora do seu âmbito imediato, conduziram a várias publicações.

No capítulo 3 foi feito um estudo mais exaustivo sobre a cintilação tendo sido apresentada caracterização teórica deste fenómeno de propagação. Foram também referidas as condições meteorológicas que potenciam a ocorrência de cintilação. Os modelos mais usados no estudo da cintilação foram apresentados: ITU, Karasawa, van de Kamp e Otung.

O capítulo 4 descreve o sistema usado neste trabalho, desde hardware até ao software. Na parte de software, onde foi investido um tempo muito significativo deste trabalho, apresentaram-se as aplicações desenvolvidas desde a aquisição até ao processamento estatístico de dados.

No capítulo 5 foram estudadas e apresentadas as estatísticas de longa duração dos parâmetros meteorológicos e da intensidade da cintilação. Para além dos parâmetros isolados foi também analisada a influência da refractividade da atmosfera, N_{wet} , na intensidade da cintilação. Este capítulo é finalizado com a validação de quatro modelos de previsão com os dados reais.

A partir da análise dos parâmetros meteorológicos, de uma forma isolada, verificou-se que as médias mensais de temperatura e a humidade relativa são os que apresentam melhor correlação com a intensidade da cintilação. Foi também realizado um estudo do comportamento horário dos parâmetros meteorológicos e da intensidade da cintilação. Neste estudo particular, verificou-se uma correlação significativa entre parâmetros que têm um comportamento regular ao longo do dia. No caso da humidade relativa o valor negativo do coeficiente de correlação deve-se ao comportamento inverso deste em relação à intensidade da cintilação.

As duas fórmulas usadas para o cálculo da refractividade, N_{wet} , dão um valor essencialmente igual. A correlação com a intensidade da cintilação é mais baixa do que obtida noutras campanhas [45], [42].

A validação dos modelos de previsão de longa duração com os dados experimentais, revelou que têm um coeficiente de correlação para as médias mensais é de aproximadamente 0.76. O valor é um pouco inferior aos dados experimentais recolhidos noutros locais.

A maior discrepância com os dados meteorológicos ocorre durante os meses de Verão que, embora exibindo uma cintilação acrescida, não é a esperada. Durante estes meses as medições meteorológicas ao nível do solo não parecem reflectir a menor turbulência relativa da atmosfera. O período de Verão em Aveiro é atípico e muito variável podendo exhibir:

- Longos períodos de uma “neblina alta” ou nevoeiro costeiro muito persistente, com temperaturas moderadas e estendendo-se numa faixa litoral até às montanhas;
- Vento do Norte seco e forte;
- Ausência de vento e temperaturas elevadas.

Pelo menos a primeira condição é uma indicação de uma atmosfera estável e pouco activa dinamicamente. O aquecimento solar da superfície é fraco e a contribuição para *buoyancy* não deve ser marcante.

Uma análise mais cuidada, condicionando os dados de algumas semanas à humidade relativa e à velocidade do vento (indicação de estabilidade atmosférica nestas condições), poderia eventualmente indiciar os factos anteriores. Um melhor entendimento da especificidade da meteorologia local poderia também ajudar.

A menor intensidade de cintilação mensal observada nos meses de Verão, parece apontar para uma especificidade sazonal que não se encontra abordada noutras publicações. No entanto recomenda-se a análise de um período mais estendido de dados experimentais. Este resultado pode ainda estar ligado a uma possível maior estabilidade atmosférica levando a que a intensidade da cintilação durante Julho, Agosto e Setembro seja baixa.

A partir destes resultados, foi também verificado que no ano em que decorreu a campanha experimental, o fenómeno de cintilação tem, para a maioria do tempo, valores inferiores aos previstos pelos modelos. Estes resultados podem dever-se ao facto do ano de 2005 ter sido um pouco atípico.

No capítulo 6 foram analisadas as distribuições de *fades*, *enhancements* e da intensidade da cintilação. Com os resultados obtidos conclui-se que as distribuições de *fades* e dos *enhancements* são muito similares às obtidas através dos modelos propostos por van de Kamp e E. Otung respectivamente.

A distribuição da intensidade da cintilação mostra que este fenómeno só é mais significativo que o previsto para uma pequena percentagem de tempo. As distribuições obtidas pelos modelos não se aproximam de uma forma satisfatória dos dados experimentais.

Apesar do trabalho realizado ser de grande importância não foi possível, devido a condicionalismos de prazos, aprofundar mais as análises do fenómeno de cintilação.

A base de dados e os resultados estatísticos já obtidos são bastante vastos e estão largamente inexplorados. Nesta tese foi feita apenas uma análise dos pontos mais importantes.

Julgamos os resultados obtidos bastante relevantes pois devido à inexistência de dados desta natureza ainda não tinha sido possível realizar um estudo semelhante num clima temperado marítimo. Para além da criação da base de dados, o desenvolvimento das aplicações de processamento de sinal e estatístico revelou-se bastante útil e eficiente.

Uma vertente de trabalho futuro será, sem dúvida, o enriquecimento da base de dados de cintilação com o processamento de, pelo menos, mais um ano de dados tendo em conta que o corrente ano foi mais seco que a média. Uma vez que existem dados radiométricos sobre o conteúdo de água líquida de vários anos e estatísticas mensais concorrentes de parâmetros meteorológicos, não é de excluir a hipótese de conseguir uma base de dados mais representativa para a validação do modelo van de Kamp usando períodos similares para os quais tenhamos dados de cintilação.

Tendo este factos em conta os próximos trabalhos irão incidir sobre a relação dos parâmetros meteorológicos com um comportamento diário regular e a intensidade da cintilação. Outro ponto de interesse será estudar a dependência entre a velocidade do vento (média anual de todas as horas do dia) condicionada à sua direcção e a intensidade da cintilação.

A dependência da velocidade do vento não se revelou conclusiva. A análise dos dados de intensidade de cintilação, condicionada à temperatura poderia ajudar a determinar alguma dependência. Estão ainda guardadas informações qualitativas e dados de sites meteorológicos sobre o estado do tempo (céu nublado ou existência de chuva) que poderão ainda ser incluídos na exploração dos dados categorizando-os em várias classes.

A análise das distribuições da intensidade de cintilação é um ponto importante pois a maioria dos modelos que fornece a distribuição cumulativa se baseia em pressupostos a ela referentes.

8 Referências

1. IEEE Wireless Communications, C.F.P., *Key Technologies and Applications of Present and Future Satellite Communications*. IEEE Wireless Communications, 2005.
2. Kamp, M.M.J.L.v.d., *Climatic Radiowave Propagation Models for the design of Satellite Communication Systems*. 1999.
3. A.D. Rocha, R. Teixeira, and J. Neves, *One Year Fade Dynamics Statistical Results for an Earth-Satellite Path at 20GHz*. COST Action 280, 3rd International Workshop, 2005: p. 1 - 7.
4. ITU-R P.1623: *Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths*. ITU Recommendations, 2003.
5. Castanet, L., T. Deloues, and J. Lemorton, *Methology to Simulate Long-Term Propagation Time Series From the Identification of Attenuation Periods Filled With Synthesized Events*, in *Cost 280 WorkShop*. 2002: Malvern, UK.
6. Van de Kamp, M., *Rain attenuation as a Markov Process: the Mean of Two Samples*, in *Cost 280 Workshop*. 2002: Malvern, UK.
7. Ahrens, C.D., *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*. Third Edition ed. 2001: Brooks/Cole. 464.
8. Wikipedia, *Surface weather analysis*, (http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_weather_analysis).
9. ITU-R P.835-4 : *Reference standard atmospheres*. ITU Recommendations, 2005.
10. Wikipedia, *Cloud*, (<http://en.wikipedia.org/wiki/Clouds>).
11. Wikipedia, *Precipitation (meteorology)*, (http://en.wikipedia.org/wiki/Precipitation_%28meteorology%29).
12. Wikipedia, *Chuva* , (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Chuva>).
13. Ishimaru, A., *Wave Propagation and Scattering in Random Media, Single Scattering and Transport Theory*. Vol. Volume 1. 1978: Academic Press, Inc.
14. M. Thurai, V. N. Bringi, and A. Rocha, *Specific Attenuation and Depolarization in Rain from 2-Dimensional Video Disdrometer Data*. IEE Proccedings on Microwaves, Antennas and Propagation, 2007. **Accepted: to appear soon**.
15. McFarquhar, G.M., S. Iacobellis, and R.C.J. Somerville, *SCM Simulations of Tropical Ice Clouds Using Observationally Based Parameterizations of Microphysics*. Journal of Climate, 2003. **16**: p. 1643-1664.
16. ITU-R P.676-5: *Attenuation by atmospheric gases*. ITU Recommendations, 2001.
17. ITU-R P.840-3: *Attenuation due to Clouds and Fog*. ITU Recommendations, 1999.
18. E. Salonen and S. Uppala, *New Prediction Method of Cloud attenuation*. ELECTRONICS LETTERS 1991. **Vol. 27**(N o . 1 2): p. 1106 - 1108.
19. Dissanayake, A., *Ka-Band Propagation Modeling for Fixed Satellite Applications*. Online Journal of Space Communication, 2002(No. 2): p. 1 - 5.
20. Rocha, A.C.D., *Caracterização do Canal de Transmissão Terra-Satélite nas bandas dos 12, 20 e 30GHz e Escalonamento na Frequência da Discriminação da Polarização Cruzada*, in *Departamento de Electronica e Telecomunicações*. 1996, Universidade de Aveiro: Aveiro, Portugal. p. 177.
21. Rec. ITU-R P.618-8: *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*. 2003.
22. ITU-R P.838-2: *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. ITU Recommendations, 2003.
23. Armando Rocha and R. Teixeira, *Ice Depolarization Revisited: New Data*. 2005.
24. Carlo Riva and J.P.V.P. Baptista, *Outage probability due to rain an scintillations in Earth-To-Space links: a rigorous approach*. International Journal of Satellite Communications, 1999.

25. Enric Vilar and J.R. Larsen, *Elevation dependence of amplitude scintillation on low elevation earth-space paths*.
26. S. M. R. Jones, et al., *Evidence for the Presence of Turbulent Attenuation on Low-Elevation Angle Earth-Space Paths-Part 2: Frequency Scaling of Scintillation Intensity on a 10° Path*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1997. **45**(1): p. 85 - 92.
27. del Pino, P.G., *Caracterización Experimental de la Propagación a 50GHz en Trayecto Inclinado*, in *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación*. 2003, Universidade Politécnica de Madrid: Madrid, Espanha. p. 268.
28. Tervonen, J.K., *Empirical Modelling of the Effects of Tropospheric Scintillation on Radiowave Propagation for Satellite Communications*, in *Department of Electrical and Communication Engineering*. 1997, Helsinki University of Technology: Helsinki.
29. Yokoi H., Yamada M., and Satoh T., *Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space*. Publications of Astronomical Society of Japan, 1970. **Vol.22**: p. 511-524.
30. Ishimaru, A., *Wave Propagation and Scattering in Random Media, Multiple Scattering, Turbulence, Rough Surfaces and Remote Sensing*. Vol. 2. 1978: Academic Press, Inc.
31. John Haddon and E. Vilar, *Scattering Induced Microwave Scintillations from Clear Air and Rain on Earth Space Paths and the Influence of Antenna-Aperture*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1986. **VOL. AP-3**(NO. 5): p. 646 - 657.
32. A. Sawaris, C.N. Kassianides, and I.E. Otung, *Observed Effects of Wind on the Intensity and Spectrum of Scintillation*. 11th International Conference on Antennas and Propagation, Conference Publication IEE 2001, 2001(No. 480): p. 546 - 550.
33. Ortgies, G., *Frequency dependence of slant-path amplitude scintillations*. ELECTRONICS LETTERS 1993. **Vol. 29**(No.25): p. 2219 - 2220.
34. Max M. J. L. van de Kamp, et al., *Frequency Dependence of Amplitude Scintillation*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, , , , 1999. **VOL. 47**(NO. 1): p. 77 - 85.
35. Kamp, et al., *Improved Models for Long-Term Prediction of Tropospheric Scintillation on Slant Paths*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1999. **VOL. 47**(NO. 2): p. 249-260.
36. Kamp, M.M.J.L.v.d., *Asymmetric signal level distribution due to tropospheric scintillation*. ELECTRONICS LETTERS, 1998. **Vol. 34**(No. 17): p. 1145 - 1146.
37. P. D. Baxter and P. Garcia, *The Extraction of Scintillation Statistics from Italsat 50 GHz Beacon Data using Wavelets*. COST280 2002: p. 1 - 20.
38. Yoshio Karasawa, Matsuichi Yamada, and J.E. Allnutt, *A New Prediction Method for Tropospheric Scintillation on Earth-Space Paths*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1988. **VOL. 36**(NO. 11): p. 1608 - 1614.
39. C. Riva and F.S. Marzano, *Scintillation modelling: a review*. COST Action 280, 4th Management Committee Meeting, 2002: p. 1 - 25.
40. ITU-R P.453-9: *The radio refractive index: its formula and refractivity data*. ITU Recommendations, 2003.
41. Otung, I.E., *Prediction of Tropospheric Amplitude Scintillation on a Satellite Link*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1996. **VOL. 44**(No. 12): p. 1600 - 1608.
42. M.M.J.L. van de Kamp, et al., *Scintillation prediction models compared to measurements on a time base of several days*. ELECTRONICS LETTERS 1996. **Vol. 32**(No. 12): p. 1074 - 1075.
43. Emilio Matricciani, Mario Mauri, and C. Riva, *Relationship between scintillation and rain attenuation at 19.77GHz*. Radio Science, 1999.

44. Jouni K. Tervonen, Max M. J. L. van de Kamp, and E.T. Salonen, *Prediction Model for the Diurnal Behavior of the Tropospheric Scintillation Variance*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1998. **VOL. 46**(NO. 9): p. 1372 - 1378.
45. A. Sawaris and I.E. Otung, *Effects of meteorological parameters and the averaging period on the intensity of tropospheric scintillation*. IEE 2003: p. 421 - 424.
46. C. Catalan and E. Vilar. *Separation of Amplitude Scintillations and Atmospheric Attenuation using Radiometer*. in *URSI Commission F Conference*. 1998. Aveiro (Portugal).
47. Rocha, A. and J. Neves. "Cloud and gases attenuation by radiometer measurements". in *International Conference on Antennas and Propagation*. Abril 2001. Manchester, U.K.
48. Rocha, A., et al. "Statistical processing of radiometer data using MatLab". in *11th International Conference on Antennas and Propagation*. April 2001. Manchester, U.K.
49. Banjo, O.P. and E. Vilar, *Measurement and Modeling of Amplitude Scintillations on Low-Elevation Earth-Space Paths and Impact on Communication Systems*. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS 1986. **VOL. COM-34**(NO. 8): p. 774 - 780.
50. A. Savvaris, Constantinos N. Kassianides, and I.E. Otung, *Observed Effects of Cloud and Wind on the Intensity and Spectrum of Scintillation*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 2004. **VOL. 52**(NO. 6): p. 1492 - 1498.